



Редакционный совет

Председатель совета

В. М. Кутузов

Заместитель председателя,
главный редактор

В. Н. Малышев

Ответственный секретарь

В. А. Мейев

В. М. Балашов (Санкт-Петербург, Россия),
А. Г. Вострецов (Новосибирск, Россия),
Ю. В. Гуляев (Москва, Россия),
Т. А. Исмаилов (Махачкала, Россия),
Б. А. Калинин (Санкт-Петербург, Россия),
Э. Ляхдеранта (Лаппеенранта, Финляндия),
С. Б. Макаров (Санкт-Петербург, Россия),
Ф. Мартин (Барселона, Испания),
В. А. Обуховец (Ростов-на-Дону, Россия),
Б. А. Панченко (Екатеринбург, Россия),
В. А. Пахотин (Калининград, Россия),
А. Д. Плужников (Нижний Новгород, Россия),
А. А. Потапов (Москва, Россия),
А. В. Соломонов (Санкт-Петербург, Россия),
Р. М. Степанов (Санкт-Петербург, Россия),
Ю. М. Таиров (Санкт-Петербург, Россия),
А. Л. Толстихина (Москва, Россия),
И. Б. Федоров (Москва, Россия),
Ю. В. Филатов (Санкт-Петербург, Россия),
М. Хайн (Ильменау, Германия),
Й. Хорстман (Гестахт, Германия),
В. А. Шевцов (Москва, Россия)

Редакционная коллегия

К. Е. Аббакумов,	Н. В. Лысенко,
В. В. Алексеев,	И. Г. Мироненко,
Е. М. Антонюк,	А. А. Монаков,
В. П. Афанасьев,	А. М. Мончак,
А. М. Боронахин,	В. А. Мошников,
С. А. Баруздин,	Н. Н. Потрахов,
А. А. Бузников,	В. Н. Ушаков,
А. А. Головков,	З. М. Юлдашев,
А. Д. Григорьев,	Ю. С. Юрченко
В. П. Ипатов,	

СОДЕРЖАНИЕ

**Радиотехнические средства передачи,
приема и обработки сигналов**

- Гоголев И. В.** Граница Крамера–Рао оценки доплеровской деформации и задержки сигнала с произвольной шириной спектра 3
- Ахметсафина Р. З.** Об обратном модифицированном z-преобразовании при неизвестном значении параметра смещения 7
- Аронов Л. А., Ерёмин И. О., Ушаков В. Н.** Влияние расходимости акустической волны на работу акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием 12

**Проектирование и технология
радиоэлектронных средств**

- Антипов М. Ю., Цицикян Г. Н.** Индуктивность прямоугольных контуров 17
- Чу Чонг Шы.** Компьютерное моделирование процессов роста тонких пленок при термическом вакуумном напылении 22

Телевидение и обработка изображений

- Лысенко Н. В., Игнатъева Н. В.** Спектроразностная обработка изображений в задачах экологического мониторинга 32

Радиолокация и радионавигация

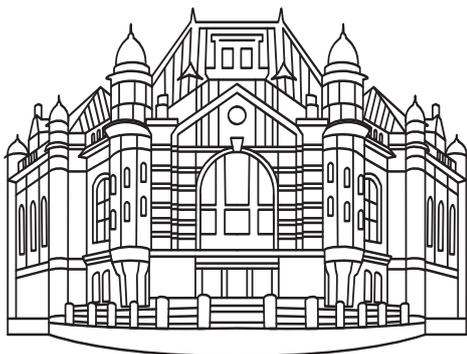
- Орлов В. К., Рамаданов В. С.** Коррекции относительных координат по дальности по методу максимального правдоподобия 38

Микро- и наноэлектроника

- Винник Д. А., Устинова И. А., Устинов А. Б.** Исследование замещенных алюминием монокристаллов гексаферрита бария–свинца ($Ba_{1-x}Pb_xFe_{12-y}Al_yO_{19}$), полученных методом спонтанной кристаллизации 45

Электроника СВЧ

- Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М., Креницкий А. П., Мещанов В. П.** Фильтр для миллиметрового диапазона длин волн с узкой полосой пропускания 49
- Тумаркин А. В., Попов А. Ю., Злыгостов М. В., Разумов С. В., Гагарин А. Г., Алтынников А. Г.** Влияние давления рабочего газа на компонентный состав и свойства тонких пленок титаната бария–стронция 53



Региональные секции редакционного совета

Восточная

Председатель – **А. Г. Вострецов**, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проректор по научной работе Новосибирского государственного технического университета.

E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru

Западная

Председатель – **В. А. Пахотин**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры радиофизики и информационной безопасности Балтийского федерального университета им. И. Канта.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Поволжская

Председатель – **А. Д. Плужников**, д-р техн. наук, профессор кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева.

E-mail: pluzhnikov@nntu.nnov.ru

Северокавказская

Председатель – **Т. А. Исмаилов**, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, ректор Дагестанского государственного технического университета.

E-mail: dstu@dstu.ru

Уральская

Председатель – **Б. А. Панченко**, д-р техн. наук, профессор-консультант Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина.

E-mail: Val.perminova@yandex.ru

Южная

Председатель – **В. А. Обуховец**, д-р техн. наук, профессор кафедры антенн и радиопередающих устройств Южного федерального университета.

E-mail: vao@tgn.sfedu.ru

▼ Редакционный отдел

Тематический указатель статей за 2016 г.....	57
Авторский указатель статей за 2016 г.....	61
Наши авторы.....	62
Требования к оформлению статей, предлагаемых для публикации в журнале "Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"	65

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8341 от 02.11.2006 г. выдано Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 45818 ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ «ПРЕССА РОССИИ». ТОМ 1 «ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ»

Подписка производится в любом почтовом отделении России

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793 (зарегистрирован Минюстом России 25 августа 2014 г., регистрационный № 33863), с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03 июня 2015 г. № 560 (зарегистрирован Минюстом России 18 июня 2015 г., регистрационный № 37697)

Редакция журнала

197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
Тел.: (812) 234-10-13
E-mail: radioelectronic@yandex.ru

Редакторы: *Э. К. Долгатов, И. Г. Скачек*
Выпускающий редактор *И. Г. Скачек*
Компьютерная верстка *Е. Н. Паздниковой*

Подписано в печать 28.12.16.
Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Гарнитура «Times New Roman».
Уч.-изд. л. 8,71. Усл.-печ. л. 8,5.
Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.). Заказ 158.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5
Тел. / факс: 8 (812) 346-28-56



УДК 621.396.96

И. В. Гоголев
АО «НИИ "Вектор"» (Санкт-Петербург)

Граница Крамера–Рао оценки доплеровской деформации и задержки сигнала с произвольной шириной спектра

Представлены границы Крамера–Рао дисперсии совместных оценок доплеровской деформации и задержки для ситуации, когда ширина спектра сигнала не позволяет применить рассмотрение в рамках узкополосной модели. Рассмотрены два подхода: оценка всех неизвестных параметров сигнала, в том числе и начальной фазы, и усреднение функционала правдоподобия по его заданному априорному распределению. Показано, что дисперсии оценок одинаковы для обоих способов решения задачи.

Доплеровская деформация, граница Крамера–Рао, матрица Фишера, случайная фаза

В стандартной модели измерений [1], [2] эхо

$$\dot{r}(t) = \dot{s}[t - \tau(t)]^1$$

излученного локатором сигнала $\dot{s}(t)$ принимается с запаздыванием $\tau(t)$. При ненулевой относительной радиальной скорости $v(t)$ оно оказывается деформированным относительно $\dot{s}(t)$ вследствие эффекта Доплера.

В узкополосной модели сигнала деформацией огибающей пренебрегают и эффект Доплера сводится к сдвигу центральной частоты сигнала ω_c на величину $\omega_d = (2v/c)\omega_c$, где c – скорость распространения электромагнитных колебаний.

Можно показать (см., например, [2]), что описание эффекта Доплера с помощью единственного параметра ω_d является следствием разложения полной модели измерений по параметру B/ω_c , где B – ширина спектра огибающей.

Для некоторых задач радиолокации, гидроакустики, а также пассивной локации [2]–[4] узкополосная модель перестает быть адекватной проводимым измерениям и информативными параметрами, подлежащими оценке, являются запаздывание τ и фактор доплеровской деформации (масштаб) σ .

В реальных задачах оценивания сигналы содержат помимо информационных параметров и мешающие, такие, как амплитуда и начальная

фаза. Незнание априорных плотностей исключает возможность нахождения байесовских оценок [5]. В этом случае переходят к критерию несмещенности и минимума условной дисперсии оценок. Особенность такого подхода заключается в том, что введенный критерий не ведет явно к конкретному правилу оценки, но именно такими асимптотическими свойствами обладает оценка по максимуму правдоподобия (ОМП). При этом нижний предел условной дисперсии любой несмещенной оценки определяется границей Крамера–Рао.

Для выяснения перспектив применения модели сигнала, не ограниченной узкополосными разложениями, необходимо вычислить нижнюю границу дисперсии оценки введенных параметров.

Постановка задачи. В общем виде принятая реализация $\dot{r}(t)$ рассматривается как функция времени t , вектора измеряемых информативных параметров $\{\tau, \sigma\}$, мешающих параметров – амплитуды a и случайной начальной фазы φ , а также содержит и помеховую составляющую:

$$\begin{aligned} \dot{r}(t) &= \dot{s}(t, a, \tau, \sigma, \varphi) + \dot{n}(t) = \\ &= a\dot{s}\left(\frac{t - \tau}{\sigma}\right)e^{i\varphi} + \dot{n}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{n}(t)$ – вклад белого гауссовского шума со спектральной плотностью N_0 . При дальнейшем рассмотрении предполагается, что априорные плотности вероятности информационных пара-

¹ Точки над обозначениями переменных указывают на аналитические сигналы.

метров и амплитуды неизвестны, а фаза распределена равномерно на интервале $[0, 2\pi]$.

Стандартную задачу – формирование уравнений для получения оценки и вычисление ее дисперсии – при большом отношении "сигнал/шум" можно решать по методу максимального правдоподобия. Известно [1], [5], что максимально правдоподобные оценки асимптотически состоятельны и эффективны, т. е. их дисперсия совпадает с нижней границей Крамера–Рао (НГКР).

При такой постановке оценка определяется как координата максимума функционала правдоподобия (ФП) $W[\dot{r}(t)|\theta]$, где θ – вектор параметров сигнала, а дисперсии компонент удовлетворяют неравенству

$$D\{\theta_i|\theta\} \geq \Phi_{ii}^{-1}. \quad (2)$$

Здесь θ_i – i -я компонента вектора θ ; Φ_{ii}^{-1} – диагональный элемент матрицы, обратной информационной матрице Фишера

$$\Phi_{ij} = -\frac{d^2 \ln W[\dot{r}(t)|\theta]}{d\theta_i d\theta_j}.$$

Таким образом, задача сводится к формированию ФП $W[\dot{r}(t)|\theta]$ и вычислению Φ_{ij} .

Вид ФП в рамках ОМП может быть различным в зависимости от выбранного способа разрешения затруднений, связанных с мешающими неинформационными параметрами.

Первый подход предполагает оценивание всех неизвестных параметров сигнала и дальнейшее отбрасывание неинформационных параметров. Это приводит к увеличению вектора измеряемых параметров, а для сигнала (1) – к увеличению размеров информационной матрицы до 4×4 .

Второй подход основан на усреднении функционала правдоподобия по мешающему параметру с учетом его априорного распределения. Для рассматриваемого случая усреднение по фазе приводит к информационной матрице с размерами 3×3 .

Из введенного описания не очевидно, что дисперсии оценки информационных параметров, вычисленные в соответствии с (2) с усреднением ФП по фазе и без такого усреднения, одинаковы и соответствуют НГКР. В настоящей статье представлено доказательство такого равенства.

Оценка с усреднением ФП по фазе. ФП реализации $\dot{r}(t)$ при условии наличия в ней сигнала имеет вид

$$W[\dot{r}(t)|a, \tau, \sigma, \varphi] = k \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\dot{r}(t) - a \dot{s} \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) e^{i\varphi} \right] \times \left[\dot{r}^*(t) - a \dot{s}^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) e^{-i\varphi} \right] dt \right\}, \quad (3)$$

где k – произвольная константа; "*" – символ комплексного сопряжения. Так как случайная фаза сигнала является неинформативной величиной с известной априорной плотностью вероятности, можно усреднить ФП по всем τ с учетом известного распределения фазы:

$$W[\dot{r}(t)|\theta] = \int W[\dot{r}(t)|\theta, \varphi] W(\varphi) d\varphi,$$

где $\theta = \{a, \tau, \sigma\}$ – вектор измеряемых параметров.

После усреднения по фазе при больших соотношениях "сигнал/шум" ФП приобретает вид

$$W[\dot{r}(t)|\theta] = k \exp \left[-\frac{E_s(\theta)}{N_0} + \frac{2Z(\theta)}{N_0} \right], \quad (4)$$

где

$$E_s(\theta) = a^2 \int \dot{s} \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) \dot{s}^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) dt;$$

$$Z(\theta) = \left| \int \dot{r}(t) a \dot{s}(t)^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) dt \right|.$$

Так как максимум ФП (4) достигается в той же точке, что и максимум логарифма ФП, то процедура вычисления оценки заключается в решении системы уравнений

$$\frac{\partial \ln W[\dot{r}(t)|\theta]}{\partial \theta_i} = 0.$$

Элементы матрицы Фишера вычисляются как соответствующие производные логарифма (4) в точке правильного решения $a = a_0$; $\tau = \tau_0$; $\sigma = \sigma_0$. Результат можно записать в виде

$$\Phi_3 = \frac{2a_0^2 E_0}{N_0 \sigma_0} \times \begin{bmatrix} \sigma_0^2 / a_0^2 & 0 & \sigma_0 / (2a_0) \\ 0 & \overline{\Omega^2} - \overline{\Omega}^2 & \frac{t \overline{\Omega^2} - \overline{\Omega} t \overline{\Omega}}{t^2 \overline{\Omega^2} - \overline{\Omega}^2} \\ \sigma_0 / (2a_0) & \frac{t \overline{\Omega^2} - \overline{\Omega} t \overline{\Omega}}{t^2 \overline{\Omega^2} - \overline{\Omega}^2} & \frac{t^2 \overline{\Omega^2} - \overline{\Omega}^2}{t^2 \overline{\Omega^2} - \overline{\Omega}^2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Выражения, входящие в матрицу Фишера (5), определяются следующим образом:

$$\overline{\Omega} = -\frac{1}{E_0} \operatorname{Im} \int \dot{s}(t) \dot{s}^*(t) dt; \quad (6)$$

$$\overline{t\Omega} = -\frac{1}{E_0} \text{Im} \int t \dot{s}(t) \dot{s}'^*(t) dt; \quad (7)$$

$$\overline{\Omega^2} = \frac{1}{E_0} \int |\dot{s}(t)|^2 dt; \quad (8)$$

$$\overline{t\Omega^2} = \frac{1}{E_0} \int t |\dot{s}'(t)|^2 dt; \quad (9)$$

$$\overline{t^2\Omega^2} = \frac{1}{E_0} \int t^2 |\dot{s}'(t)|^2 dt, \quad (10)$$

причем

$$E_0 = \int \dot{s} \left(\frac{t-\tau_0}{\sigma_0} \right) \dot{s}^* \left(\frac{t-\tau_0}{\sigma_0} \right) dt; \quad (11)$$

верхней чертой обозначено усреднение по времени; штрихом – производная по времени.

В (6)–(11) форма обозначений выбрана с целью подчеркнуть аналогию с результатами, известными для узкополосной модели. Зависимость матричных элементов матрицы Фишера (5) от выбора начала отсчета подробно исследована в [6]–[8] и далее не рассматривается.

Дисперсии оценки информационных параметров τ и σ вычисляются в соответствии с (2):

$$D_\tau = \frac{1}{\det \Phi_3} \bar{M}_{22}; \quad D_\sigma = \frac{1}{\det \Phi_3} \bar{M}_{33},$$

где \bar{M}_{ii} – дополнительный минор элемента Φ_{3ii} матрицы Φ_3 . После несложных вычислений получим:

$$D_\tau = \frac{N_0 \sigma_0}{2a_0^2 E_0} \frac{(\overline{t^2\Omega^2} - \overline{t\Omega^2}) - 1/4}{D}; \quad (12)$$

$$D_\sigma = \frac{N_0 \sigma_0}{2a_0^2 E_0} \frac{\overline{\Omega^2} - \bar{\Omega}^2}{D}, \quad (13)$$

где

$$D = (\overline{\Omega^2} - \bar{\Omega}^2) \left[(\overline{t^2\Omega^2} - \overline{t\Omega^2}) - 1/4 \right] + (\overline{t\Omega^2} - \bar{\Omega} \bar{t\Omega})^2.$$

Оценка полного вектора параметров сигнала.

Перепишем исходный функционал правдоподобия (3):

$$W[\dot{r}(t)|a, \tau, \sigma, \varphi] = k \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\dot{r}(t) - a \dot{s} \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) e^{i\varphi} \right]^2 dt \right\}.$$

$$\times \left[\dot{r}^*(t) - a \dot{s}^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) e^{-i\varphi} \right] dt \Bigg\}.$$

Записав вектор измеряемых параметров как $\theta = \{a, \tau, \sigma, \varphi\}$ и раскрыв скобки под интегралом, получим:

$$W[\dot{r}(t)|\theta] = k \exp \left\{ -\frac{E_s(a, \tau, \sigma)}{N_0} + \frac{2 \text{Re}[z(\theta)]}{N_0} \right\}, \quad (14)$$

где

$$E_s(a, \tau, \sigma) = a^2 E_0(\tau, \sigma) = a^2 \int \dot{s} \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) \dot{s}^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) dt;$$

$$z(\theta) = \int \dot{r}(t) a \dot{s}^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) \exp(-i\varphi) dt.$$

Матрица Фишера для ФП (14) имеет вид

$$\Phi_4 = \frac{2a_0^2 E_0}{N_0 \sigma_0} \times \begin{bmatrix} \sigma_0^2/a_0^2 & 0 & \sigma_0/(2a_0) & 0 \\ 0 & \overline{\Omega^2} & \overline{t\Omega^2} & \bar{\Omega} \\ \sigma_0/(2a_0) & \overline{t\Omega^2} & \overline{t^2\Omega^2} & \overline{t\Omega} \\ 0 & \bar{\Omega} & \overline{t\Omega} & \sigma_0^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Элементы информационной матрицы оценки вектора параметров $\theta = \{a, \tau, \sigma, \varphi\}$ определены в [9], но полученный в ней результат нельзя считать верным, так как в указанной работе принято $\Phi_{13} = \Phi_{a\sigma} = 0$, что приводит к выводу о некоррелированности измерений амплитуды и деформации сигнала. В полученной матрице (15) отмеченная ошибка устранена, т. е. учтена корреляция результатов измерений амплитуды и деформации сигнала.

Дисперсии оценок τ и σ вычисляются в соответствии с (2):

$$D_\tau = \frac{1}{\det \Phi_4} \bar{L}_{22}; \quad D_\sigma = \frac{1}{\det \Phi_4} \bar{L}_{33},$$

где \bar{L}_{ii} – дополнительный минор элемента Φ_{4ii} матрицы Φ_4 .

Несмотря на различия в размерах матриц (5) и (15), а также на различный вид их компонент, справедливы равенства

$$\det \Phi_4 = -\det \Phi_3; \quad \bar{L}_{22} = -\bar{M}_{22}; \quad \bar{L}_{33} = -\bar{M}_{33}.$$

Полученные результаты показывают, что дисперсия оценки информационных параметров не зависит от выбранного подхода к формированию ФП при наличии мешающих параметров.

Так как ОМП асимптотически эффективны, то полученные выражения (12), (13) можно трактовать как НГКР совместной оценки доплеровской задержки и деформации для сигнала со случайной начальной фазой и неизвестной амплитудой. Выражения для дисперсии оценок параметров сигнала со случайной фазой и известной амплитудой получены ранее в [7].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

При использовании модели сигнала, не ограниченной разложениями по малым параметрам, необходимо переходить от оценки задержки и до-

плеровского сдвига частоты к совместным оценкам задержки и доплеровской деформации сигнала. Полученные в настоящей статье выражения для дисперсии оценок введенных параметров позволяют вычислить НГКР для сигнала произвольной формы.

Несмотря на то, что информационные матрицы измерений при оценке всех параметров сигнала и при усреднении функционала правдоподобия по начальной фазе с учетом формы ее распределения различны, дисперсии оценок информационных параметров оказываются одинаковыми. Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбор способа построения оценки по максимуму правдоподобия не влияет на дисперсию оценки, а полученные выражения для дисперсии совместных оценок задержки и доплеровской деформации совпадают с НГКР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван-Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: в 3 т. / пер. с англ., под ред. В. Т. Горяинова. М.: Сов. радио, 1977. Т. 3. 664 с.
2. Swick D. A. An Ambiguity Function Independent of Assumptions about Bandwidth and Carrier Frequency // NRL Report 6471, 1966. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/645918.pdf> (дата обращения 11.12.2016).
3. Гоголев И. В., Яшин Г. Ю. Ограничения узкополосного разностно-временного и разностно-частотного методов и их модификация для широкополосного сигнала // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 5. С. 75–78.
4. Weiss L. G. Wavelets and Wideband Correlation Processing // IEEE Signal Processing Magazine. 1994. P. 13–32.
5. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
6. Трифонов А. П., Беспалова М. Б. Сверхширокополосная оценка дальности, скорости и ускорения // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. Т. 46, № 5/6. С. 3–11.
7. Гоголев И. В., Яшин Г. Ю. Граница Крамера–Рао совместной оценки доплеровской деформации и задержки сигнала со случайной начальной фазой // XXII Междунар. науч.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь", Воронеж, 19–21 апр. 2016 г. / НПФ "САКВОЕЕ". Воронеж, 2016. Т. 1. С. 42–46.
8. Jin Q., Wong K. M., Luo Z. The Estimation of Time Delay and Doppler Stretch of Wideband Signals // IEEE Trans. on Signal Proc. 1995. Vol. SP-43. P. 904–916.
9. Wei H., Ye S., Wan Q. Influence of Phase on Cramer–Rao Lower Bounds for Joint Time Delay and Doppler Stretch Estimation // Proc. of 9th Intern. Symp. on Signal Processing and Its Applications (ISSPA-2007), Sharjah, 12–15 Feb. 2007. Piscataway: IEEE, 2007. P. 1–4.

I. V. Gogolev

JSC «SRI "Vector"» (Saint Petersburg)

Doppler stretch and delay Cramer–Rao lower bound for signal with large bandwidth

In this paper Cramer–Rao lower bound of joint Doppler stretch and delay estimation for wideband signal is derived. We use wideband term to denote cases in which narrowband signal model is inappropriate. Two alternative estimation methods are considered: first method implies estimation of all unknown parameters, both desired and nuisance; second involves the averaging of likelihood function by nuisance parameter with considering its probability density. Estimation variances are equal for specified methods.

Doppler stretch, Cramer–Rao Lower Bound, Fisher Information Matrix, Unknown Phase

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2016 г.

УДК 681.51

Р. З. Ахметсафина
 Национальный исследовательский университет
 "Высшая школа экономики"

Об обратном модифицированном z -преобразовании при неизвестном значении параметра смещения

Рассмотрен алгоритм обратного модифицированного z -преобразования при значении запаздывания, не кратном интервалу дискретизации. Основу алгоритма составляет оценка параметра смещения решетчатой функции (дробной части запаздывания) как решение уравнения, реализующего дробно-рациональное представление передаточной функции непрерывной части.

Запаздывание, параметр смещения, обратное модифицированное z -преобразование

Поводом написания настоящей статьи послужили посты на форуме сообщества пользователей MathWorks® [1], [2] с обсуждением темы "как осуществить обратное z -преобразование передаточной функции" и "как преобразовать систему с запаздыванием из непрерывной в дискретную и затем из дискретной в непрерывную с сохранением результата?". Для преобразования модели из представления в дискретном времени в представление в непрерывном в MATLAB применяется функция **d2c** из расширения System Identification Toolbox [3] (для обратного преобразования применяется функция **c2d** из состава другого инструментального расширения – Control System Toolbox [4]).

Рассмотрим приведенный на форуме пример. Исходные данные:

```
>>H = tf(1,[1 1.8 .9])
>>Hz = c2d(H,ts,'zoh')
>>H_obratnoe_1 = d2c(Hz,'zoh')
```

Функция (рис. 1) демонстрирует, что задача решается корректно: после прямого и обратного дискретных z -преобразований с экстраполятором нулевого порядка (zero-order hold – zoh) восстанавливается исходная передаточная функция в s -области.

Протестируем эту последовательность преобразований, добавив в s -области запаздывание, кратное интервалу дискретизации, равному 0.5 ($\tau = 0$, рис. 2, а), и не кратное этому интервалу ($\tau = 0.7$, рис. 2, б):

```
>>H = tf(1,[1 1.8 .9], 'InputDelay', tau)
>>Hz = c2d(H,ts,'zoh')
>>H_obratnoe_1 = d2c(Hz,'zoh')
```

Анализ рис. 2 показывает, что при запаздывании, кратном интервалу дискретизации, пара взаимно обратных преобразований выполняется

```
>>H = tf(1,[1 1.8 .9])
>>Hz = c2d(H,ts,'zoh')
>>H_obratnoe_1 = d2c(Hz,'zoh')
```

```
Transfer function:
      1
-----
s^2 + 1.8 s + 0.9

Transfer function:
  0.09297 z + 0.06884
-----
z^2 - 1.261 z + 0.4066

Sampling time: 0.5

Transfer function:
      1
-----
s^2 + 1.8 s + 0.9
```

Рис. 1

корректно: восстанавливается исходная передаточная функция. Однако по некротной задержке после прямого и обратного преобразований получена модель, не совпадающая с исходной: функция в s -области представляет собой нерациональную дробь, а задержка отличается от введенной. Алгоритм функции **c2d** корректно реализует классическое в теории дискретных систем преобразование [5]–[8]. Проблема заключается в функции **d2c**: запаздывание модели в непрерывном времени рассчитывается только кратным интервалу дискретизации.

В составе расширения Control System Toolbox есть еще одна функция **d2d** [9], выполняющая пересчет дискретной модели для нового интервала дискретизации. Однако она также работает некорректно при не кратном интервалу дискретизации запаздывании линейной части модели.

<p>Transfer function:</p> $\frac{1}{s^2 + 1.8s + 0.9}$ <p>Transfer function:</p> $z^{-2} * \frac{0.09297z + 0.06884}{z^2 - 1.261z + 0.4066}$ <p>Sampling time: 0.5</p> <p>Transfer function:</p> $\frac{1}{s^2 + 1.8s + 0.9}$	<p>Transfer function:</p> $\frac{1}{s^2 + 1.8s + 0.9}$ <p>Transfer function:</p> $z^{-2} * \frac{0.03764z^2 + 0.115z + 0.009173}{z^2 - 1.261z + 0.4066}$ <p>Sampling time: 0.5</p> <p>Transfer function:</p> $\frac{0.03764s^2 + 0.2965s + 1}{s^2 + 1.8s + 0.9}$
<i>a</i>	<i>б</i>

Рис. 2

Постановка задачи. Рассмотрим обратное модифицированное z -преобразование [10], [11] при неизвестном значении параметра смещения (моды) ε . Дискретная система (ДС) состоит из идеального импульсного элемента, включаемого с интервалом дискретизации T_0 , экстраполятора нулевого порядка и непрерывной части (НЧ) с передаточной функцией (ПФ) $W^*(s)$ (рис. 3).

ПФ НЧ в s -области имеет вид

$$W^*(s) = \frac{B^*(s)}{A^*(s)} e^{-\tau s} = \frac{\sum_{i=0}^p b_i^* s^{p-i}}{s^n + \sum_{i=1}^n a_i^* s^{n-i}} e^{-\tau s} = \frac{B^*(s) e^{-\tau s}}{s^{l-1} \prod_{i=2}^l (s - s_i)^{r_i}}, \quad (1)$$

где τ – запаздывание; p и n – натуральные числа ($p < n$); b_i^* , a_i^* – вещественные коэффициенты; l – количество несовпадающих полюсов; $s_1 = 0$, s_2, \dots, s_l – не равные друг другу полюсы дроби (1); r_i – кратности полюсов $\left(\sum_{i=1}^l r_i = n + 1\right)$.

ПФ ДС в z -области связана с ПФ НЧ прямым z -преобразованием [6]:

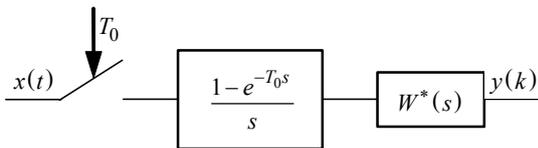


Рис. 3

$$W(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{1}{s} W^*(s) \right\} = \frac{B(z)}{A(z)} z^{-d} = \frac{\sum_{i=0}^n b_i z^{n-i}}{z^n + \sum_{i=1}^n a_i z^{n-i}} z^{-d} = \frac{B(z) z^{-d}}{(z-1)^{l-1} \prod_{i=2}^l (z - z_i)^{r_i}}, \quad (2)$$

где $Z\{\cdot\}$ – оператор z -преобразования; b_i , a_i – вещественные коэффициенты; $d \geq 1$ – количество интервалов дискретизации (натуральное число); $z_1 = 1$, z_2, \dots, z_r – не равные друг другу полюсы дроби (2).

В ДС запаздывание НЧ представляется в виде целого числа d интервалов дискретизации T_0 . Дробная часть запаздывания (не кратная интервалу дискретизации часть остатка запаздывания НЧ) в модели не выделяется и учитывается в числителе ПФ ДС при модифицированном z -преобразовании. Запаздывание представляется суммой целой d и дробной m частей:

$$\tau = (d + m - 1)T_0 = (d - \varepsilon)T_0,$$

где $m = 1 - \varepsilon$, $m \in [0, 1)$, $\varepsilon \in (0, 1]$.

Для рассматриваемой ДС при модифицированном z -преобразовании $Z_\varepsilon\{\cdot\}$:

$$H(z) = \frac{z}{z-1} \frac{B(z)}{A(z)} = Z_\varepsilon \left\{ \frac{1}{s} \frac{B^*(s)}{A^*(s)} \right\} = Z_\varepsilon \{ H^*(s) \},$$

а при обратном модифицированном z -преобразовании

$$H^*(s) = Z_\varepsilon^{-1} \{ H(z) \}. \quad (3)$$

В общем случае при известном параметре смещения обратное модифицированное z -преобразование (3) осуществляется после разложения на простые дроби (учитывая кратные и комплексно-сопряженные полюсы – корни знаменателя дроби (1)) [6]:

$$H(z) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} \frac{G_{ji}}{(z^{-1} - z_i^{-1})^{j+1}};$$

$$H^*(s) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} \frac{D_{ji}}{(s - s_i)^{j+1}},$$

где G_{ji} и D_{ji} – коэффициенты разложения на простые дроби. Полюсы дробей связаны соотношениями $s_i = \ln(z_i)/T_0$.

Если при преобразовании из дискретной модели в непрерывную известна только ПФ ДС, а параметр смещения ε неизвестен, формально решением является ПФ НЧ, определенная обратным модифицированным z -преобразованием при любом значении параметра $\varepsilon \in (0, 1]$, что порождает неопределенность. При использовании функции **d2c** эту неопределенность решают наиболее простым способом, принимая $\varepsilon \equiv 0$. Таким образом запаздывание определяется с точностью целого интервала дискретизации, а требование получения рациональной дроби в записи ПФ НЧ выполняется, если ПФ ДС также записывается в виде рациональной дроби. В результате при выполнении условия кратности задержки интервалу дискретизации прямое и обратное преобразования дают правильный результат (рис. 2, а), а при не кратности – порождают ошибку (рис. 2, б).

Обратное модифицированное z -преобразование. Рассмотрим методику, позволяющую ликвидировать ограничение кратности задержки интервалу дискретизации.

Оценка неизвестного параметра смещения. В [12] предложено определить дополнительное уравнение для параметра смещения ε из свойства записи ПФ НЧ дробно-рациональной функцией (1): порядок полинома числителя дроби меньше порядка полинома знаменателя. Через обратное преобразование Лапласа можно записать

$$L^{-1}\{H^*(s)\}\Big|_{t=0} = h^*(+0) = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) формально описывает свойство реализуемой ПФ НЧ, записанной в дробно-рациональной форме: переходный процесс $h^*(t)$ без учета запаздывания должен начинаться с нуля.

Разложим $H(z)$ в степенной ряд:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k z^{-k},$$

где коэффициенты h_k определяются как

$$h_k = \frac{d^k H(z)}{d(z^{-1})^k} \Big|_{z^{-1}=0} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} (-1)^{j+1} G_{ji} C_{k+j}^k z_i^{k+j+1}.$$

Введем обозначение:

$$C_{k+j}^k = \binom{k+j}{k} = \frac{1}{j!} \sum_{q=0}^j (-1)^{q+j} S(j+1, q+1) k^q,$$

где $S(i, j)$ – числа Стирлинга первого рода [13]. Перегруппируем слагаемые, не зависящие от индекса k , используя эти числа:

$$h_k = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} \left[(-1)^{j+1} \sum_{q=j}^{r_i-1} G_{qi} \frac{S(q+1, j+1)}{q!} z_i^{q+1} \right] k^j z_i^k =$$

$$= \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} G_{ji}^* k^j z_i^k,$$

где G_{ji}^* – вспомогательные коэффициенты.

Поскольку $h_k = h^*[(k + \varepsilon)T_0]$, для (4) формально можно записать $h^*(0) = h_{-\varepsilon}$, откуда

$$F(\varepsilon) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} G_{ji}^* (-\varepsilon)^j z_i^{-\varepsilon} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) связывает известные параметры ПФ ДС G_{ji} с неизвестным значением параметра смещения ε через G_{ji}^* . Уравнение решается численными методами (например, методом Ньютона) в интервале $\varepsilon \in (0, 1]$.

Пересчет параметров модели. Коэффициенты h_k связаны с $H^*(s)$ следующим образом:

$$h_k = L^{-1}\{H^*(s)\}\Big|_{t=(k+\varepsilon)T_0} = h^*[(k + \varepsilon)T]_0 =$$

$$= \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} D_{ji} \frac{[(k + \varepsilon)T_0]^j}{j!} z_i^{k+\varepsilon}.$$

Это позволяет при известном параметре смещения ε сформировать систему уравнений для определения коэффициентов разложения на простые дроби ПФ НЧ D_{ji} , исходя из известных коэффициентов разложения на простые дроби ПФ ДС G_{ji} через вспомогательные коэффициенты G_{ji}^* :

$$z_i^\varepsilon \sum_{q=j}^{r_i-1} D_{qi} \frac{C_{q}^j T_0^q \varepsilon^{q-j}}{q!} = G_{ji}^*, \quad i = \overline{1, l}; \quad j = \overline{0, r_i - 1},$$

где $G_{ji}^* = (-1)^{j+1} \sum_{q=j}^{i-1} G_{qi} \frac{S(q+1, j+1)}{q!} z_i^{q+1}$.

Так, для инерционного звена первого порядка при не кратном T_0 запаздывании τ имеем:

$$W^*(s) = \frac{b_0^*}{s + a_1} e^{-\overbrace{(d-\varepsilon)T_0}^{\tau} s} \Leftrightarrow W(z) = \frac{b_0 z + b_1}{z + a_1} z^{-d}$$

В этом случае можно получить явную зависимость параметра смещения от коэффициентов числителя и знаменателя ПФ ДС:

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{b_0 + b_1}{b_1 - a_1 b_0}\right)}{\ln(-a_1)}$$

При представлении порядка числителя дроби (1) в виде $p = n - 1 - \nu$, где $0 < \nu < n$ – натуральное число, справедливо условие

$$\left. \frac{d^\nu h^*(t)}{dt^\nu} \right|_{t=0} = h^{*(\nu)}(+0) = 0$$

(верхний индекс в круглых скобках обозначает порядок производной), а для оценки неизвестного параметра смещения вместо уравнения (5) следует использовать уравнение $F^{(\nu)}(\varepsilon) = 0$. Такая замена обусловлена тем, что функция (5) при кратных полюсах может не пересекать ось ε . Производная ν -го порядка гарантирует наличие корня уравнения.

На рис. 4 представлена упрощенная (без выделения кратных полюсов) MATLAB-функция, реализующая разработанное модифицированное обратное z -преобразование.

Протестируем функцию на исходном примере:

```
>>H = tf(1,[1 1.8 .9], 'InputDelay', tau)
>>Hz = c2d(H,ts, 'zoh')
>>H_obratnoe_2 = d2c_with_zoh(Hz)
```

Результат тестирования, представленный на рис. 5, показывает, что поставленная задача успешно решена: пара обратных преобразований приводит к исходной функции вне зависимости от значения смещения.

```
function sysc = d2c_with_zoh(sysd)
% d2c_with_zoh Conversion of discrete LTI models to
% continuous time (ZOH and unknown delay parameter)
% R.Z. Akhmetsafina, 2016, rakhmetsafina@hse.ru
eps1 = eps*1e10;
BZ = sysd.num{1}; AZ = sysd.den{1};
d = sysd.InputDelay; % Запаздывание в Z-области
if BZ(1) ~= 0, d = d + 1; end
AZ = fliplr(AZ); BZ = fliplr(BZ);
AS = conv(-AZ,[1 -1]);
[g z K] = residue(BZ,AS); Ts = sysd.Ts;
s = -log(z)/Ts; st = s.*Ts; stll = g;
deriv = 0; z_1 = z.^(-1-eps1);
% Оценка разности порядков полинома
% знаменателя и числителя в S-области
while real(sum(stll)*(stll.'*z_1)) > 0
    deriv = deriv + 1; stll=stll; stll=stl.*st;
end
m0 = 0.5; MaxIter = 50; Iter = 0; Done = 0;
stl = stll; stll = stl.*st;
% Оценка параметра смещения m
% (метод Ньютона)
while (~Done) && (Iter<MaxIter)
    m = m0-(stl.'*(z.^(-m0)))/(stll.'*(z.^(-m0)));
    Done = abs(m - m0) <= eps1;
    m0 = m; Iter = Iter + 1;
end
m = real(m); c = -g.*z.^(-m);
[BS AS] = residue(c, s, K);
tau = (d+m-1)*Ts; % Запаздывание в S-области
AS = real(AS(1:end-1));
BS = real(BS(2+deriv:end));
sysc = sysd; sysc.Ts = 0;
sysc.Variable= 's';
sysc.InputDelay = tau; sysc.ioDelay = 0;
sysc.num{1} = BS; sysc.den{1} = AS;
end
```

Рис. 4

Transfer function: $\exp(-1*s) * \frac{1}{s^2 + 1.8 s + 0.9}$	Transfer function: $\exp(-0.7*s) * \frac{1}{s^2 + 1.8 s + 0.9}$
Transfer function: $z^{(-2)} * \frac{0.09297 z + 0.06884}{z^2 - 1.261 z + 0.4066}$	Transfer function: $z^{(-2)} * \frac{0.03764 z^2 + 0.115 z + 0.009173}{z^2 - 1.261 z + 0.4066}$
Sampling time: 0.5	Sampling time: 0.5
Transfer function: $\exp(-1*s) * \frac{1}{s^2 + 1.8 s + 0.9}$	Transfer function: $\exp(-0.7*s) * \frac{1}{s^2 + 1.8 s + 0.9}$
<i>a</i>	<i>б</i>

Рис. 5

По результатам проведенного исследования можно сделать следующий вывод. При обратном модифицированном z -преобразовании, когда задана только ПФ ДС в z -области, в качестве неизвестного параметра смещения $\varepsilon \in (0, 1]$ предлагается принять значение, обеспечивающее условие дробно-рациональности результирующей дроби ПФ НЧ в s -области [12]. Исходя из такого условия, может быть получено дополнительное

уравнение для оценки неизвестного параметра смещения εz -преобразования. В настоящей статье предложен и реализован алгоритм, позволяющий осуществлять обратное модифицированное z -преобразование при не кратном интервале дискретизации значения запаздывания для ДС, соответствующих структуре, представленной на рис. 3, и ПФ НЧ вида (1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Z-преобразование. URL: <http://matlab.exponenta.ru/forum/post13182.html> (дата обращения 21.07.2016).
2. How can I convert a system with delay from continuous to discrete and from discrete to continuous and the result be the same? URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/9203-how-can-i-convert-a-system-with-delay-from-continuous-to-discrete-and-from-discrete-to-continuous-an> (дата обращения 21.07.2016).
3. d2c. URL: <http://www.mathworks.com/help/ident/ref/d2c.html> (дата обращения 21.07.2016).
4. c2d. URL: <http://www.mathworks.com/help/control/ref/c2d.html> (дата обращения 21.07.2016).
5. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и z -преобразования. М.: Книга по требованию, 2012. 288 с.
6. Литвинов А. П. О машинном вычислении передаточных функций дискретных систем управления // Изв. вузов. Приборостроение. 1973. Т. 16, № 12. С. 31–34.
7. Попов Н. Р., Попов И. И. О формулах дискретного преобразования Лапласа, Фурье, z -преобразования и их применение // Радиотехника. 2000. Вып. 116. С. 28–34.
8. Kollár I., Franklin G. F., Pintelon R. On the Equivalence of z -domain and s -domain Models in System Identification // Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., Brussels, Belgium, June, 1996. Piscataway: IEEE, 1996. Vol. 1. P. 14–19.
9. d2d. URL: <http://www.mathworks.com/help/control/ref/d2d.html> (дата обращения 21.07.2016).
10. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования / пер. с англ. М.: Физматгиз, 1963. 455 с.
11. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем. М.: Физматгиз, 1963. 968 с.
12. Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З. Обратное z -преобразование при идентификации дискретных систем с запаздыванием // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 5. С. 15–25.
13. Липский В. Комбинаторика для программистов / пер. с польск. М.: Мир, 1988. 213 с.

R. Z. Akhmetsafina

National Research University "Higher School of Economics"

Inverse Modified Z-Transform with Unknown Delay Parameter

An algorithm for inverse modified z -transform with delay is considered. The delay parameter is a fraction of the sampling period. The fractional part of the delay is computed as the solution of the equation representing the rational transfer function of continuous part

Time delay, delay parameter, inverse modified Z-transform

Статья поступила в редакцию 19 мая 2016 г.

УДК 621.391(681.325:535)

Л. А. Аронов, И. О. Ерёмин, В. Н. Ушаков
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние расходимости акустической волны на работу акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием

Рассмотрена работа акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием с учетом расходимости акустической волны. Показано, что расходимость ультразвука приводит к значительной неравномерности распределения акустического давления по апертуре акустооптического модулятора, что влечет ухудшение разрешающей способности устройства по частоте.

Акустооптический спектроанализатор, расходимость акустической волны

Акустооптические спектроанализаторы (АОС) применяются при обнаружении и анализе сигналов, когда требуется широкая рабочая полоса, отсутствие пропусков по частоте и относительно высокое быстродействие. Для оценки характеристик таких устройств разработаны математические модели [1], [2], в которых распределение акустической волны в апертуре акустооптического модулятора (АОМ) принимается равномерным. При более строгом подходе распространение ультразвука в звукопроводе требует учета расходимости акустической волны в соответствии с законами дифракции, что влияет на аппаратную функцию (АФ) спектроанализатора и его основные характеристики.

В настоящей статье рассмотрен гомодинный акустооптический спектроанализатор (ГАОС) [3], обладающий широкой полосой анализа, высоким динамическим диапазоном и относительной простотой конструкции.

В основе структурной схемы ГАОС (рис. 1) лежит интерферометр Юнга. В состав схемы входят источник монохроматического излучения 1, коллимирующая линза 2, двухканальный АОМ 3, трансформирующая линза 4 и матричный фотоприемник (МФП) 5. В качестве источника излучения 1 целесообразно использовать полупроводниковый лазер. Генерируемое им расходящееся излучение преобразуется коллимирующей линзой 2 в плоскую волну. Световой поток облучает апертуру двухканального АОМ 3, на один из каналов которого подается анализируемый сигнал $s(t)$, а на другой – опорный сигнал $r(t)$. После прохождения АОМ световой поток фокусируется сферической линзой 4 в плоскости апертуры фотоприем-

ника 5. В качестве фотоприемника могут использоваться как устройства мгновенного действия, так и устройства с накоплением. Наибольшее применение находят устройства с накоплением на основе прибора с зарядовой связью. Они имеют до нескольких тысяч элементов как по горизонтальной координате ξ , так и по вертикальной координате η , что позволяет достичь высокой разрешающей способности.

В качестве опорного сигнала $r(t)$ выбирают последовательность широкополосных импульсов с равномерным спектром. Это могут быть ЛЧМ-импульсы [4] или бинарный фазоманипулированный сигнал [5].

Выбор режима дифракции в данном случае не является принципиальным, поэтому для определенности остановимся на режиме Брэгга.

Рассмотрим простейшую конструкцию одного канала АОМ (рис. 2). Акустическая волна возбуждается электроакустическим преобразователем (ЭАП) с размерами $l \times H$ и распространяется вдоль оси x .

При проектировании ЭАП в составе АОМ можно считать, что размеры ЭАП удовлетворяют условию $l \gg H$, а значит, в первую очередь необ-

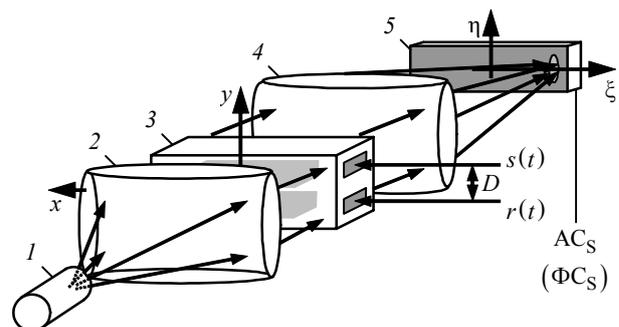


Рис. 1

ходимо учитывать расходимость акустической волны вдоль оси y . Пусть на поверхности ЭАП звуковое поле распределено равномерно:

$$P(t, x, y)|_{x=0} = P_m(t) e^{j\Omega t},$$

где $P_m(t)$ – комплексная огибающая акустической волны; Ω – несущая частота акустической волны. Опишем распределение звукового давления в объеме АОМ интегралом Рэлея–Зоммерфельда:

$$P(t, x, y) = -\frac{j}{\Lambda} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} P_m(t) e^{j\Omega t} \frac{e^{jKr}}{r} \cos\theta dx dy,$$

где Λ – длина акустической волны; K – волновое число акустической волны; r – длина вектора, соединяющего точку на поверхности ЭАП и точку в объеме АОМ; θ – угол между этим вектором и осью x , причем $\cos\theta = x/r$.

Зная распределение звукового давления в объеме АОМ, можно найти закон $\Delta n(t, x, y)$ изменения оптического показателя преломления [6]:

$$\Delta n(t, x, y) = B \operatorname{Re}[P(t, x, y)], \quad (1)$$

где B – коэффициент, учитывающий размерности. Выражение (1) описывает оптические неоднородности, формируемые анализируемым и опорным сигналами в объеме АОМ. В результате дифракции световой волны с комплексной амплитудой напряженности поля $E_0(x, y)$ на этих оптических неоднородностях на выходе АОМ возникают два параллельных световых пучка:

$$E_s(x, y, t) = B_1 E_0(x, y) \times \operatorname{rect}\left(\frac{x}{2L}, \frac{y-D/2}{H_0}\right) e^{j\omega_{св}t} e^{-j\Delta n_s(x, y, t)}, \quad (2)$$

$$E_r(x, y, t) = B_1 E_0(x, y) \times \operatorname{rect}\left(\frac{x}{2L}, \frac{y+D/2}{H_0}\right) e^{j\omega_{св}t} e^{-j\Delta n_r(x, y, t)}, \quad (3)$$

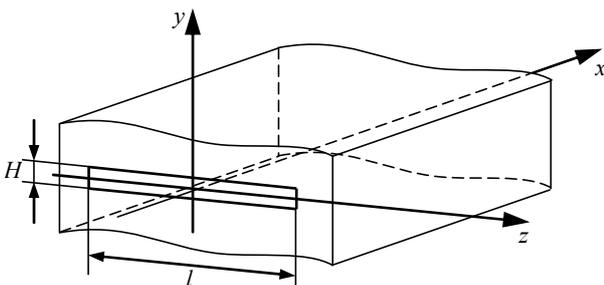


Рис. 2

где B_1 – комплексная константа, включающая не-принципиальные для рассмотрения постоянные множители;

$$\operatorname{rect}(\mu, \nu) = \begin{cases} 1, & (|\mu| \leq 0.5) \cap (|\nu| \leq 0.5); \\ 0, & (|\mu| > 0.5) \cup (|\nu| > 0.5) \end{cases}$$

– двумерная безразмерная прямоугольная функция единичной ширины и высоты; $2L$ – размер (апертура) АОМ в направлении распространения акустической волны; D – расстояние между ЭАП каналов АОМ (рис. 1); H_0 – размер апертуры одного канала АОМ вдоль оси y ; $\omega_{св}$ – круговая частота световой волны; $\Delta n_s(x, y, t)$, $\Delta n_r(x, y, t)$ – изменения оптического коэффициента преломления в каналах анализируемого s и опорного r сигналов АОМ соответственно.

В режиме дифракции Брэгга выражения (2) и (3) можно записать в виде суммы недифрагированной и дифрагированной световых волн. Перейдя в (2) и (3) к комплексным огибающим оптических волн, сохранив только слагаемые и множители, представляющие интерес, получим:

$$E_s^{+1}(x, y, t) = B' E_0(x, y) \Delta n_s(x, y, t); \quad (4)$$

$$E_r^{+1}(x, y, t) = B' E_0(x, y) \Delta n_r(x, y, t), \quad (5)$$

где B' выполняет прежние функции объединения незначущих множителей.

Для дальнейшего рассмотрения интересен только случай, когда несущие частоты анализируемого и опорного сигналов равны: $\Omega_s = \Omega_r = \Omega$.

Трансформирующая линза 4 осуществляет пространственное преобразование Фурье [7]:

$$E_{s\phi.п}(p, q, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_s^{+1}(x, y, t) e^{jpx} e^{-jqy} dy dx; \quad (6)$$

$$E_{r\phi.п}(p, q, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_r^{+1}(x, y, t) e^{jpx} e^{-jqy} dy dx, \quad (7)$$

где $p = k\xi/F$, $q = k\eta/F$ – пространственные частоты в плоскости $\xi\eta$ (рис. 1); k – волновое число световой волны, причем F – фокусное расстояние линзы 4. Разные знаки в показателях экспонент отображают тот факт, что оси $0y$ и 0η сонаправлены, а оси $0x$ и 0ξ направлены в разные стороны. Поскольку фотоприемник расположен в

фокальной плоскости линзы 4, выражения (6) и (7) описывают распределение светового поля в его светочувствительной плоскости. Они формируют интерференционную картину в плоскости МФП, которая за время накопления (T_H) обеспечивает распределение заряда $Q(\eta, \xi)$. Один из его компонентов позволяет определить амплитудный и фазовый спектры анализируемого сигнала [2], [3].

Будем считать, что АОМ облучается плоской однородной волной, т. е. $E_0(x, y) = \text{const}$. Пусть опорным сигналом является последовательность ЛЧМ-импульсов. В качестве анализируемого сигнала целесообразно выбрать гармоническое воздействие. Аппаратная функция, полученная как реакция на такое воздействие, позволяет определить основные рабочие характеристики устройства.

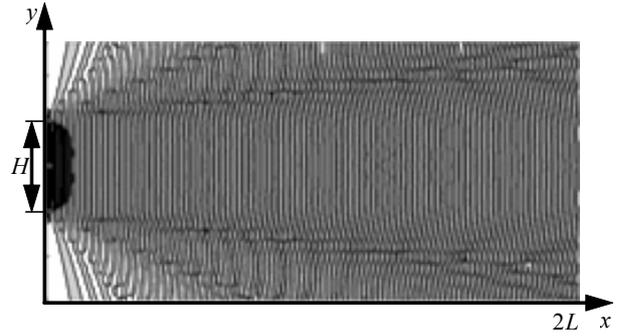
Рассмотрим распределение акустического давления в канале анализируемого сигнала АОМ при минимальной рабочей длине акустической волны $\Lambda = \Lambda_{\min}$ (рис. 3, а) и при максимальной рабочей длине волны $\Lambda = \Lambda_{\max}$ (рис. 3, б). На рисунках светлые тона соответствуют высокому давлению, темные – низкому. Соотношение длин волн $\Lambda_{\min} : \Lambda_{\max} = 1 : 20$. При этом соблюдается условие $H \gg \Lambda_{\max}$, что делает ЭАП эффективным излучателем. Распределение для $\Lambda = \Lambda_{\max}$ в трехмерной проекции показано на рис. 4.

Из рис. 3, а, в следует, что сигнал с высокой частотой формирует область высокого акустического давления вблизи ЭАП, волна расходится слабо, но сильно затухает по мере распространения. Низкочастотная волна (рис. 3, б) затухает медленнее и излучается менее направленно.

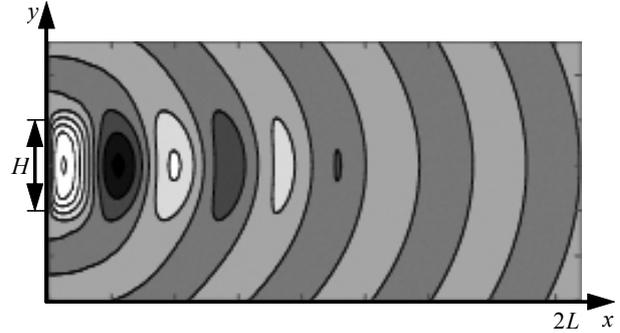
Распределение акустического давления для опорного сигнала в виде последовательности ЛЧМ-импульсов представлено на рис. 3, в. Распределение получено для момента времени, когда импульс целиком заполняет апертуру АОМ: низкие частоты в начале апертуры (слева), высокие – в конце.

Следует ожидать, что по мере распространения импульса по апертуре АОМ картина распределения акустического давления будет значительно меняться, так как разные частотные составляющие сигнала затухают и расходятся по-разному.

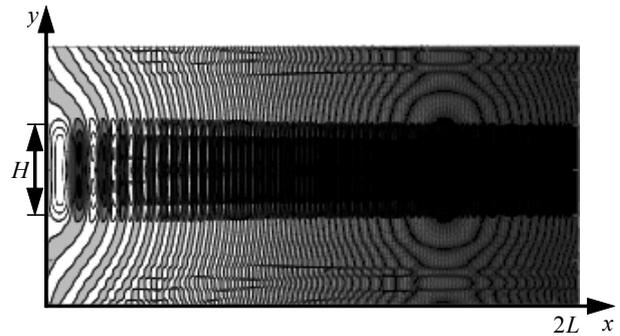
Представленные на рис. 3, 4 распределения свидетельствуют о существенной неоднородности звукового поля в объеме АОМ: значительный уровень акустического давления вблизи ЭАП, низкий уровень – в конце апертуры АОМ (рис. 4).



а



б



в
Рис. 3

Неравномерно распределение давления и в вертикальном сечении (рис. 3). Такая неравномерность может рассматриваться как двумерная весовая функция при расчете интегралов (6) и (7). В результате АФ $A(f)$ искажается (рис. 5, 1 – нормированная АФ с учетом расходимости ультразвука, 2 – без учета расходимости). Из зависимостей следует, что неравномерное распределение звуко-

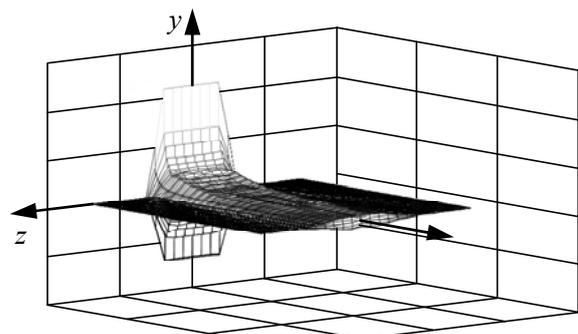
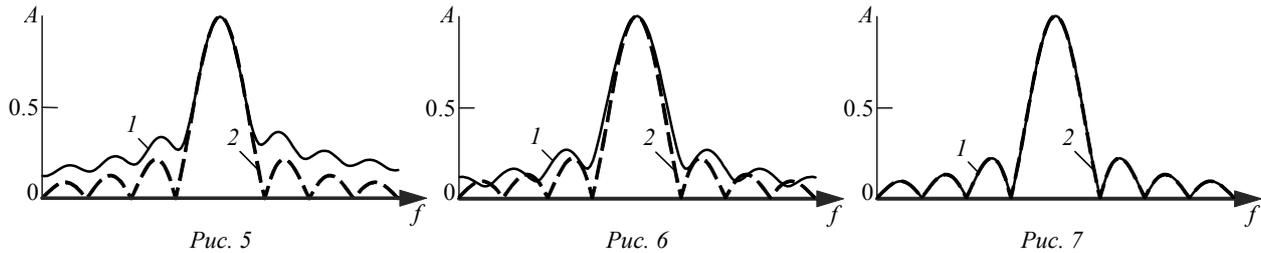


Рис. 4



вого давления в апертуре АОМ приводит к значительным искажениям АФ в области боковых лепестков, что ухудшает разрешающую способность спектроанализатора по частоте.

Простейший способ избежать значительных искажений – перекрыть участок апертуры АОМ вблизи ЭАП непрозрачной диафрагмой. Однако уменьшение рабочей апертуры АОМ приведет к снижению потенциально достижимой разрешающей способности, поэтому выбор размера области затенения является вопросом поиска компромисса, зависящего от конкретных задач, стоящих перед системой, в составе которой работает спектроанализатор. Рис. 6 иллюстрирует случай, когда область затенения составляет $1/8$ от всей рабочей апертуры АОМ, что составляет примерно $\Lambda_{\max}/2$.

Рассматривая результат подстановки (4) и (5) в (6) и (7) соответственно, справедливо трактовать множители вида (1) как весовые функции или функции окна, что позволяет предложить еще один метод компенсации искажений, вызванных расходимостью ультразвука в АОМ. Поставим за АОМ амплитудный транспарант с функцией прозрачности $T(x)$. Так, экспериментально подобранная функция прозрачности $T(x) = \sqrt{x}$ обеспечивает компенсацию искажений, вызванных

дифракцией акустической волны в АОМ, на уровне погрешности вычислений (рис. 7).

В зависимости от стоящих задач амплитудный транспарант может обеспечивать не только компенсацию искажений, но и оконное взвешивание, позволяющее, в частности, снизить уровень боковых лепестков.

Таким образом, для получения более точных оценок достижимых характеристик АОС необходимо учитывать расходимость акустических волн в объеме АОМ. Высокая неравномерность распределения акустического давления вдоль апертуры АОМ приводит к значительным искажениям АФ устройства и ухудшению его разрешающей способности по частоте. Простейшим вариантом частичной компенсации этого эффекта является использование диафрагмы, затеняющей область вблизи ЭАП АОМ. Диафрагма может быть выполнена из любого непрозрачного материала, а ее положение целесообразно подбирать экспериментально. Применение амплитудного транспаранта с переменной вдоль апертуры АОМ прозрачностью обеспечивает более высокую степень компенсации искажений. Кроме того, на транспарант могут быть наложены дополнительные функции по возможной коррекции формы АФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. 112 с.
2. Оптические устройства в радиотехнике / А. Ю. Гринев, К. П. Наумов, Л. Н. Пресленев, Д. В. Тигин, В. Н. Ушаков / под ред. В. Н. Ушакова. 2-е изд. М.: Радиотехника, 2009. 264 с.
3. Грачев С. В., Рогов А. Н., Ушаков В. Н. Гомодинный акустооптический анализатор спектра с пространственным и временным интегрированием // Радиотехника. 2003. № 4. С. 23–28.
4. Аронов Л. А., Ушаков В. Н. Гомодинный акустооптический спектроанализатор с ЛЧМ-импульсом в качестве опорного сигнала // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 5. С. 59–65.
5. Аронов Л. А., Ушаков В. Н. Гомодинный акустооптический спектроанализатор с непрерывным бинарным фазоманипулированным радиоисигналом в качестве опорного сигнала // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 6. С. 13–16.
6. Егоров Ю. В., Ушаков В. Н. Учет дифракции Френеля акустического пучка в одноканальном модуляторе // Акустооптические методы и техника обработки информации / ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). Л., 1980. С. 33–41. (Межвуз. сб. Вып. 142.)
7. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 354 с.

L. A. Aronov, I. O. Eryomin, V. N. Ushakov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Analysis of Functioning of Acousto-Optic Spectrum Analyzer with Spatial Integration in Case of Acoustic Beam Divergence

The functioning of homodyne acousto-optic spectrum analyzer with acoustic wave divergence taken into consideration is observed. It is shown that divergence leads to sufficient irregularity of acoustical pressure and farther to the frequency resolution degradation.

Homodyne Acousto-Optic Spectrum Analyzer, Acoustic Wave Divergence

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2016 г.



УДК 621.3.013.71

М. Ю. Антипов, Г. Н. Цицикян
ЦНИИ СЭТ, филиал ФГУП "Крыловский государственный
научный центр" (Санкт-Петербург)

Индуктивность прямоугольных контуров

Рассмотрено взаимное влияние двух прямоугольных контуров при их различных конфигурациях. Получены формулы для расчета взаимоиндукции и на их основе построены зависимости коэффициента взаимной индукции от расстояния между различными по форме контурами. Установлена связь коэффициентов взаимной индукции для различных вариантов контуров.

Взаимная индуктивность, электродинамические силы

В радиотехнике и электронике применяются резонансные контуры с прямоугольными катушками индуктивности. Затруднение при проектировании устройств вызывает отсутствие в ряде случаев выражений для расчета индуктивных параметров прямоугольных контуров, в частности, расположенных в одной плоскости. В связи с этим ключевую роль приобретают расчетные выражения для определения индуктивностей прямолинейных параллельных проводников, имеющиеся, например, в [1]–[5].

Выражение для взаимной индукции двух параллельных прямолинейных проводников (рис. 1) имеет вид [5]

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[l_1 \ln \frac{l_2' + l_2 - l_1 + a_1}{l_2' - l_1 + a_1'} + l_2 \ln \frac{l_2' + l_2 + a_2'}{l_2' + l_2 - l_1 + a_1} + l_2' \ln \frac{(l_2' + l_2 + a_2')(l_2' - l_1 + a_1')}{(l_2' + l_2 - l_1 + a_1)(l_2' + a_2)} + a_1 + a_2 - a_1' - a_2' \right], \quad (1)$$

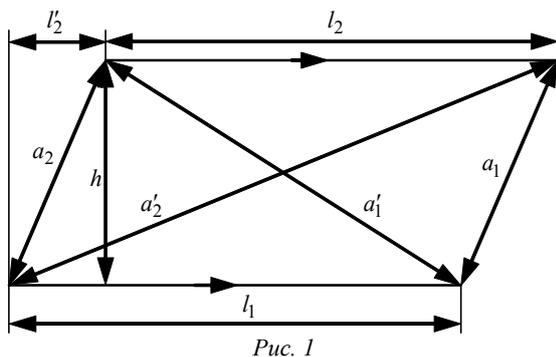


Рис. 1

где μ_0 – магнитная постоянная;

$$a_1 = \sqrt{(l_2 + l_2' - l_1)^2 + h^2}; \quad a_2 = \sqrt{(l_2')^2 + h^2}; \\ a_1' = \sqrt{(l_1 - l_2')^2 + h^2}; \quad a_2' = \sqrt{(l_2' + l_2)^2 + h^2}.$$

Выражение (1) можно привести к выражениям из [3], [4], если использовать обозначения:

$$a_1 = D; \quad a_2 = C; \quad a_1' = B; \quad a_2' = A; \quad l_2' = c; \\ l_1 = c - b; \quad l_2 = d - b; \quad l_2' + l_2 = c + d - b = a,$$

Тогда (1) принимает вид

$$M = \mu_0 / (4\pi) \times \left\{ \ln \frac{(a+A)^a (b+B)^b}{(d+D)^d (c+C)^c} + (C+D) - (A+B) \right\}. \quad (2)$$

Следует отметить, что выражение (2), хотя выглядит компактнее (1), не дает существенных преимуществ при определении взаимных индуктивностей прямоугольных контуров.

Рассмотрим систему двух расположенных вдоль одной линии проводников l_1 и l_2 при расстоянии d между ними (рис. 2). В этом случае (1) можно представить в следующем виде:

$$M|_{h=0} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[l_1 \ln \frac{l_1 + l_2 + d}{l_1 + d} + l_2 \ln \frac{l_1 + l_2 + d}{l_2 + d} + d \ln \frac{(l_1 + l_2 + d)d}{(l_2 + d)(l_1 + d)} \right]. \quad (3)$$

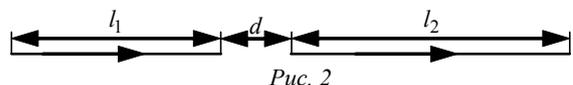


Рис. 2

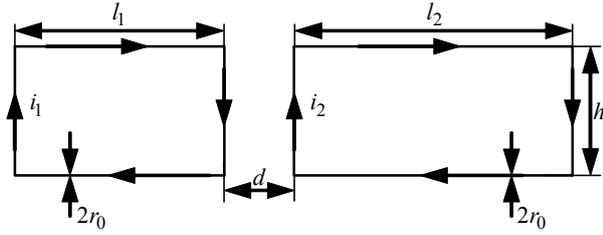


Рис. 3

Результат (3) при дополнительном условии $l_1 = l_2 = l$ приводится к виду, известному из [6]:

$$M(l_1 = l_2 = l, d, h = 0) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[2l \ln \frac{2l+d}{l+d} + d \ln \frac{d(2l+d)}{(l+d)^2} \right], \quad (4)$$

что может служить доказательством справедливости формулы (1). Однако, с другой стороны, он лишь частично совпадает с формулой из широкоизвестного источника [7]. Выявившееся противоречие потребовало подробного рассмотрения задачи о взаимной индукции двух прямоугольных контуров (рис. 3).

Для определения взаимной индуктивности между контурами определим отдельно вклады, даваемые горизонтальными и вертикальными проводниками контуров. Для вклада горизонтальных проводников имеем:

$$\begin{aligned} M_{\Gamma} &= M|_{h=0} + M|_{h \neq 0} = \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ l_1 \ln \frac{l_1 + l_2 + d}{l_1 + d} + \right. \\ &+ l_2 \ln \frac{l_1 + l_2 + d}{l_2 + d} + d \ln \frac{d(l_1 + l_2 + d)}{(l_1 + d)(l_2 + d)} - \\ &- l_1 \ln \frac{l_2 + d + \sqrt{(l_2 + d)^2 + h^2}}{d + \sqrt{d^2 + h^2}} - \\ &- l_2 \ln \frac{l_1 + l_2 + d + \sqrt{(l_1 + l_2 + d)^2 + h^2}}{l_2 + d + \sqrt{(l_2 + d)^2 + h^2}} - \\ &- (l_1 + d) \times \\ &\times \left(\ln \left\{ \left[l_1 + l_2 + d + \sqrt{(l_1 + l_2 + d)^2 + h^2} \right] \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \left(d + \sqrt{d^2 + h^2} \right) \right\} - \right. \\ &- \ln \left\{ \left[l_2 + d + \sqrt{(l_2 + d)^2 + h^2} \right] \times \right. \\ &\quad \left. \left. - \left[l_1 + d + \sqrt{(l_1 + d)^2 + h^2} \right] \right\} - \right. \\ &- \sqrt{(l_2 + d)^2 + h^2} - \sqrt{(l_1 + d)^2 + h^2} + \\ &\left. + \sqrt{d^2 + h^2} + \sqrt{(l_1 + l_2 + d)^2 + h^2} \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

Вклад во взаимную индуктивность вертикальных проводников длиной h , расположенных

на расстояниях d , $l_1 + d$, $l_2 + d$ и $l_1 + l_2 + d$, запишем в виде

$$\begin{aligned} M_{\text{В}} &= -\frac{\mu_0}{2\pi} \left[h \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + d^2}}{d} - \sqrt{h^2 + d^2} + d - \right. \\ &- h \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + (l_1 + d)^2}}{l_1 + d} + \sqrt{h^2 + (l_1 + d)^2} - \\ &- (l_1 + d) - h \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + (l_2 + d)^2}}{l_2 + d} + \\ &+ \sqrt{h^2 + (l_2 + d)^2} - (l_2 + d) + \\ &+ h \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + (l_1 + l_2 + d)^2}}{l_1 + l_2 + d} - \\ &\left. - \sqrt{h^2 + (l_1 + l_2 + d)^2} + (l_1 + l_2 + d) \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

После ряда преобразований в (6) взаимная индуктивность для контуров на рис. 3 определится суммированием выражений (5) и (6):

$$\begin{aligned} M &= M_{\Gamma} + M_{\text{В}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l_1 \ln \frac{l_1 + l_2 + d}{l_1 + d} + \right. \\ &+ l_2 \ln \frac{l_1 + l_2 + d}{l_2 + d} + d \ln \frac{d(l_1 + l_2 + d)}{(l_1 + d)(l_2 + d)} - \\ &- l_1 \ln \frac{l_1 + l_2 + d + s_{12}}{l_1 + d + s_1} - l_2 \ln \frac{l_1 + l_2 + d + s_{12}}{l_2 + d + s_2} - \\ &- d \ln \frac{(l_1 + l_2 + d + s_{12})(d + s_0)}{(l_2 + d + s_2)(l_1 + d + s_1)} - \\ &- h \ln \frac{(h + s_0)(h + s_{12})(l_1 + d)(l_2 + d)}{(l_1 + l_2 + d)d(h + s_1)(h + s_2)} + \\ &\left. + 2(s_0 + s_{12}) - 2(s_1 + s_2) \right], \quad (7) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} s_0 &= \sqrt{d^2 + h^2}; \quad s_1 = \sqrt{(l_1 + d)^2 + h^2}; \\ s_2 &= \sqrt{(l_2 + d)^2 + h^2}; \quad s_{12} = \sqrt{(l_1 + l_2 + d)^2 + h^2}. \end{aligned}$$

Корректность формулы (7) подтверждается сопоставлением расчета по ней и результата в [2] для двух контуров с размерами $l_1 = 0.3$ м, $l_2 = 0.2$ м, $d = 0.25$ м, $h = 0.1$ м, полученного на основе промежуточных приемов. Взаимная индуктивность в соответствии с [2] равна $6.35 \cdot 10^{-10}$ Гн, а по (7) $-6.366 \cdot 10^{-10}$ Гн, т. е. результаты расчетов практически совпадают.

Положив $l_1 = l_2 = l$, получим выражение для взаимной индуктивности одинаковых контуров:

$$M(l, d, h) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[2l \ln \frac{(2l+d)(l+d+s_l)}{(l+d)(2l+d+s_{2l})} + d \ln \frac{d(2l+d)(l+d+s_l)^2}{(l+d)^2(2l+d+s_{2l})(d+s_0)} + h \ln \frac{(h+s_l)^2(2l+d)d}{(l+d)^2(h+s_{2l})(h+s_0)} + 2(s_0+s_{2l}) - 4s_l \right], \quad (8)$$

где

$$s_{2l} = \sqrt{h^2 + (2l+d)^2}; \quad s_l = \sqrt{h^2 + (l+d)^2}; \\ s_0 = \sqrt{h^2 + d^2}.$$

Коэффициент магнитной связи между контурами определяется как

$$K = |M| / \sqrt{L_1 L_2}. \quad (9)$$

Для его определения наряду с (8) воспользуемся формулой для индуктивности прямоугольного контура (рамки) (рис. 4) со сторонами h и l_p и шириной (диаметром провода) $2r_0$ ($r_0 \ll h, l_p$):

$$L_p = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ l_p \ln \frac{2l_p h}{r_0 (l_p + \sqrt{l_p^2 + h^2})} + h \ln \frac{2l_p h}{r_0 (h + \sqrt{l_p^2 + h^2})} + 2 \left[r_0 + \sqrt{l_p^2 + h^2} - (l_p + h) \right] \right\}. \quad (10)$$

Вывод (10) приведен в [8].

Например, для системы из двух контуров одинаковых размеров при $h = 0.2$ м, $l_p = l_1 = l_2 = 0.2$ м, $r_0 = 1$ мм по (10) получим:

$$L_1 = L_2 = 4 \cdot 10^{-7} \left\{ 2 \cdot 0.2 \ln \frac{2 \cdot 0.2 \cdot 0.2}{0.001 (0.2 + \sqrt{0.2^2 + 0.2^2})} + \right.$$

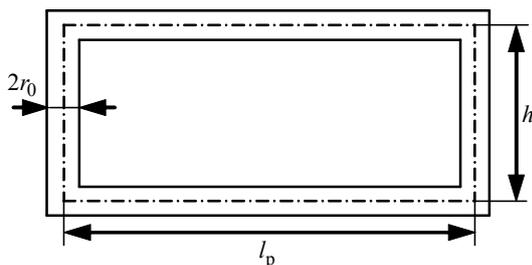


Рис. 4

$$+ 2 \left(0.001 + \sqrt{0.2^2 + 0.2^2} - 2 \cdot 0.2 \right) \Big\} = 7.247 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.}$$

Тогда при $d = 0.1$ м коэффициент магнитной связи в соответствии с (9) составляет:

$$K|_{d=0.1} = \frac{8.795 \cdot 10^{-9}}{7.247 \cdot 10^{-7}} = 1.214 \cdot 10^{-2},$$

а при $d = 1$ м:

$$K|_{d=1} = \frac{9.456 \cdot 10^{-11}}{7.247 \cdot 10^{-7}} = 1.305 \cdot 10^{-4},$$

т. е. при увеличении расстояния между контурами на порядок коэффициент магнитной связи между ними уменьшился на 2 порядка.

Выражение для взаимной индукции двух контуров разных размеров (рис. 5) приводим без вывода:

$$M_2(l, d, h_{22} + h_{11}, h_{22} - h_{11}) = \mu_0 / (2\pi) \times \\ \times \left[2(l+d) \ln \frac{l+d+s_l^+}{2l+d+s_l^-} + (2l+d) \ln \frac{2l+d+s_{2l}^-}{2l+d+s_{2l}^+} + (h_{22} + h_{11}) \times \ln \frac{(h_{22} + h_{11} + s_l^+)^2 (2l+d)d}{(l+d)^2 (h_{22} + h_{11} + s_{2l}^+) (h_{22} + h_{11} + s_0^+) - (h_{22} - h_{11}) \times} \right. \\ \left. \times \ln \frac{(l+d)^2 (h_{22} - h_{11} + s_{2l}^-) (h_{22} - h_{11} + s_0^-)}{(h_{22} - h_{11} + s_l^-)^2 (2l+d)d} + 2(s_0^+ - s_0^- + s_{2l}^+ - s_{2l}^-) + 4(s_l^- - s_l^+) \right], \quad (11)$$

где

$$s_0^+ = \sqrt{(h_{22} + h_{11})^2 + d^2}; \quad s_0^- = \sqrt{(h_{22} - h_{11})^2 + d^2}; \\ s_l^+ = \sqrt{(h_{22} + h_{11})^2 + (l+d)^2};$$

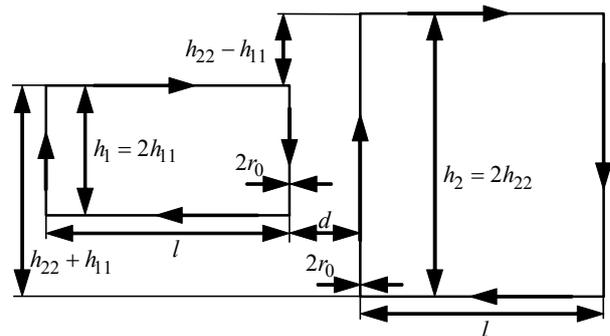


Рис. 5

$$s_l^- = \sqrt{(h_{22} - h_{11})^2 + (l + d)^2},$$

$$s_{2l}^+ = \sqrt{(h_{22} + h_{11})^2 + (2l + d)^2};$$

$$s_{2l}^- = \sqrt{(h_{22} - h_{11})^2 + (2l + d)^2}.$$

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента взаимной индукции от расстояния между контурами d для линейных размеров, представленных в таблице.

Осуществив ряд преобразований, перепишем (11) в следующем виде:

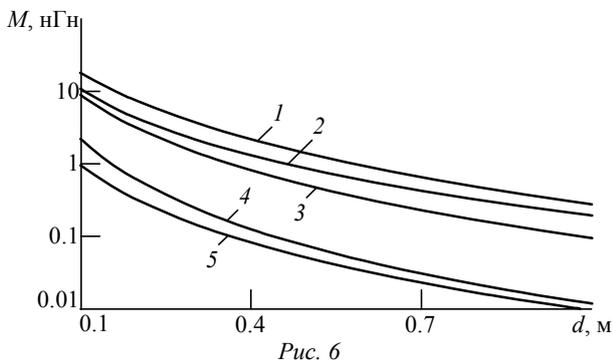
$$M_2(l, d, h_{22} + h_{11}, h_{22} - h_{11}) = \mu_0 / (2\pi) \times$$

$$\times \left\{ 2l \left[\ln \frac{l + d + s_l^+}{2l + d + s_{2l}^+} - \ln \frac{l + d + s_l^-}{2l + d + s_{2l}^-} \right] + \right.$$

$$+ d \left[\ln \frac{(l + d + s_l^+)^2}{(2l + d + s_{2l}^+)(d + s_0^+)} - \right.$$

$$\left. - \ln \frac{(l + d + s_l^-)^2}{(2l + d + s_{2l}^-)(d + s_0^-)} \right] +$$

$$\left. + (h_{22} + h_{11}) \times \right.$$



Кривая	h_{11}	h_{22}	l_1	l_2
	м			
1	0.1	0.3	0.2	0.2
2	0.1	0.1	0.2	0.6
3	0.1	0.1	0.2	0.2
4	0.1	0.1	0.2	0.02
5	0.1	0.01	0.2	0.2

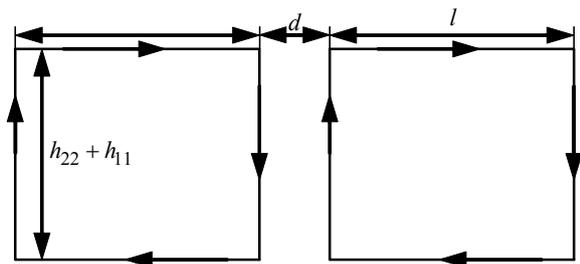


Рис. 7

$$\times \ln \frac{(h_{22} + h_{11} + s_l^+)^2 (2l + d) d}{(l + d)^2 (h_{22} + h_{11} + s_{2l}^+) (h_{22} + h_{11} + s_0^+) - (h_{22} - h_{11}) \times}$$

$$\times \ln \frac{(h_{22} - h_{11} + s_l^-)^2 (2l + d) d}{(l + d)^2 (h_{22} - h_{11} + s_{2l}^-) (h_{22} - h_{11} + s_0^-)} +$$

$$\left. + 2s_0^+ + 2s_{2l}^+ - 4s_l^+ - 2s_0^- - 2s_{2l}^- + 4s_l^- \right\}. \quad (12)$$

Прибавим и вычтем удвоенное значение коэффициента взаимной индукции (4). При этом (12) может быть представлено в виде

$$M_2(l, d, h_{22} + h_{11}, h_{22} - h_{11}) =$$

$$= M_1(l, d, h_{22} + h_{11}) - M_1(l, d, h_{22} - h_{11}). \quad (13)$$

Таким образом, (13) можно интерпретировать как суперпозицию двух пар контуров (рис. 7).

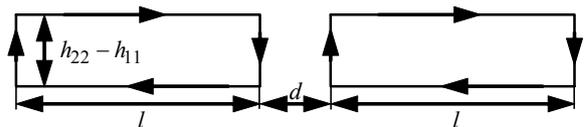
При $h_{22} - h_{11} = 0$

$$\ln \frac{l + d + s_l^-}{2l + d + s_{2l}^-} = 0; \quad s_l^- = 0$$

и (12) переходит в (8) с учетом того, что $h_{22} + h_{11} = h$.

К числу очевидных практических приложений полученных выражений следует отнести определение электродвижущих сил взаимной индукции в контурах по заданным изменениям токов во времени $e_2 = -M(di_1/dt)$ и $e_1 = -M(di_2/dt)$. Можно показать, что при повороте одного из контуров на 90° вокруг оси, расположенной в плоскости рис. 3 и 5, коэффициент магнитной индукции и связи между контурами будут равен нулю.

Другое практическое приложение полученных результатов относится к рассмотрению электродинамического взаимодействия контуров с током при различных нестационарных процессах в них. Определим силы, воздействующие на вертикальные отрезки проводников правой рамки с током i_2 со стороны вертикальных отрезков левой рам-



ки i_1 (рис. 3) [5]:

$$f'_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi d} i_1 i_2 \left[2\sqrt{d^2 + h^2} - 2d - 4\sqrt{(d+l)^2 + h^2} + 4(d+l) + 2\sqrt{(d+2l)^2 + h^2} - 2(d+2l) \right] = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \left[\frac{\sqrt{d^2 + h^2}}{d} + \frac{\sqrt{(d+2l)^2 + h^2}}{d} - 2\frac{\sqrt{(d+l)^2 + h^2}}{d} \right], \quad (14)$$

К этой силе следует добавить силу взаимодействия горизонтальных проводников левой рамки с вертикальными проводниками правой рамки. На основании выражений для сил в [5] имеем:

$$f''_{21} = \left[\mu_0 / (2\pi) \right] i_1 i_2 \times \left\{ \ln \left[d(d+2l) \left(d+l + \sqrt{(d+l)^2 + h^2} \right)^2 \right] - \ln \left[(d+l)^2 \left(d + \sqrt{d^2 + h^2} \right) \times \left(d+2l + \sqrt{(d+2l)^2 + h^2} \right) \right] \right\}. \quad (15)$$

Объединив (14) и (15), получим окончательный результат для силы, действующей в горизонтальном направлении: $f_{21} = f'_{21} + f''_{21}$.

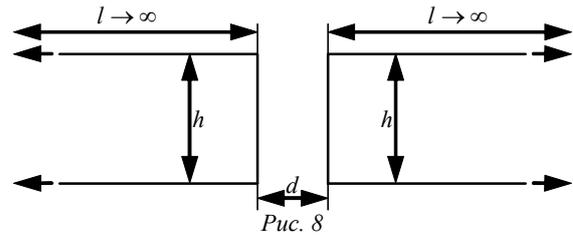


Рис. 8

В предельном случае $h \ll l$ (рис. 8):

$$f_{21}|_{h \ll l} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \left(\frac{\sqrt{d^2 + h^2}}{d} - 1 - \ln \frac{d + \sqrt{d^2 + h^2}}{2d} \right).$$

Этот результат может быть проверен на основании (8) при $h \ll l$ в соответствии с определением силы: $f_d = i_1 i_2 (\partial M / \partial d)$.

При $d = h$ имеем:

$$f_{21}|_{d=h, l \rightarrow \infty} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi} \left[\sqrt{2} - 1 - \ln \frac{1 + \sqrt{2}}{2} \right] = 45.2 i_1 i_2 \text{ нН.}$$

В настоящей статье получены формулы для коэффициентов само- и взаимной индукции прямоугольных контуров, расположенных в одной плоскости в конфигурациях рис. 2, 5, которые могут быть рекомендованы для практического использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grover F. W. Inductance Calculations. Working Formules and Table / D. Van Nostrand Co. inc. New York, 1947. 98 p.
2. Калантаров П. А., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: справ. кн. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 198 с.
3. Ramo S., Whinnery J. R., Van Duzer T. Field And Waves in Communication Electronics. New York: Wiley, 1965. 844 p.
4. Tesche F. M., Ianoz M., Karlsson T. EMC Analysis Methods and Computational Models. New York: Wiley, 1997. 623 p.
5. Цицикян Г. Н. Электродинамические силы в токоведущих частях электрических комплексов / ФГУП "Крыловский государственный научный центр". СПб., 2016. 93 с.
6. Lee Y. Antenna Circuit Design for RFID Applications. Microchip AN710 / Microchip Technol. Inc. Chandler, USA, 2003. P. DS00710C (1-50).
7. Мейнке Х., Гундлах Ф. В. Радиотехнический справочник: в 2 т. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. Т. 1. 417 с.
8. Paul C. R. Inductance: Loop and Partial. New-York: Wiley, 2011. 379 p.

M. Yu. Antipov, G. N. Tsitsikyan
 FSUE "CSRI MET" (Branch of the FSUE "Krylov State Research Center") (Saint Petersburg)

The Inductance of the Rectangular Contours

The influence of two rectangular contours with their various configurations is considered. The formulas for calculation of mutual induction are received and based on them the dependences of the coefficient of mutual induction of the distance between the contours with various shapes are built. The connection of the coefficients of mutual induction for a variety contours is installed.

Partial Inductance, Electrodynamic Forces

Статья поступила в редакцию 7 октября 2016 г.

УДК 004.94

Чу Чонг Шы

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Компьютерное моделирование процессов роста тонких пленок при термическом вакуумном напылении

Рассмотрены различные механизмы процесса роста тонких пленок на атомном уровне с учетом различных факторов при термическом вакуумном напылении. Продемонстрировано влияние этих факторов на качество получаемых пленок. При промежуточном механизме процесса роста тонких пленок для определения номера частицы применен метод Монте-Карло, для определения направления движения выбранной частицы – квазиньютоновский решетчатый метод. Проанализирован процесс фрактального роста с учетом всех факторов. Рассмотрены возможности управления процессом роста тонких пленок.

Компьютерное моделирование, рост тонких пленок, термическое вакуумное напыление, метод Монте-Карло, парный взаимный потенциал Леннарда-Джонса, фрактальная структура

Роль компьютерного моделирования при решении задач в области микро- и нанотехнологии постоянно растет. Повышение качества пленок важно для применения в различных производственных областях. Моделирование процессов получения пленок высокого качества современными методами, выявление особенностей процесса и управляемых параметров является весьма актуальной и интересной задачей [1]–[4].

В настоящей статье описано исследование процесса роста тонких пленок при термическом вакуумном напылении (ТВН) компьютерным моделированием при разных условиях конденсации, температуры и состоянии поверхности подложки.

Процесс ТВН удобно разделить на четыре этапа [5]: парообразование вещества, перенос частиц от испарителя к подложкам, конденсация и рост пленок.

Авторы [6] для выявления факторов, влияющих на качество получаемых пленок с помощью компьютерного моделирования, провели анализ процессов, протекающих на первом и втором этапах при условии, что частицы конденсируются на подложке без отражения от нее.

В зависимости от сил взаимодействия между испаряемыми частицами и испаряемой частицей и частицей на подложке выделяют три режима роста пленки [5]: островковый (кластерный) (Фольмера–Вебера), послойный (Франка–Ван-дер-Мерве) и промежуточный (Странского–Крастаного). В настоящей статье рассмотрены модели роста пленки в послойном и промежуточном режимах.

Алгоритм роста пленки в послойном режиме кратко изложим следующим образом (в двумерном представлении алгоритм проиллюстрирован на рис. 1). Примем, что частицы (на рис. 1 обозначены цифрами) имеют форму цилиндра с радиусом R_0 и высотой $2R_0$. Условимся, что частицы осаждаются по нормали к подложке и адсорбируются на уже имеющийся слой частиц (наслаиваются). Взаимодействием между осаждающимися частицами пренебрегаем. В рамках рассмотренной модели на процесс осаждения влияет непостоянная плотность частиц, уже осажденных на поверхность подложки (рис. 2, нормировка координат описана далее). Модель, построенная с учетом этого фактора, отличается от случая использования расчетной формулы относительной толщины пленки (идеальная модель) [6]. На рис. 2 представлен результат компьютерного моделирования для пленок из разных материалов (на рис. 2, а радиус частиц R_0 в два раза больше, чем радиус на рис. 2, б). Как следует из рис. 2, этот параметр существенно влияет на локальные изменения толщины пленки.



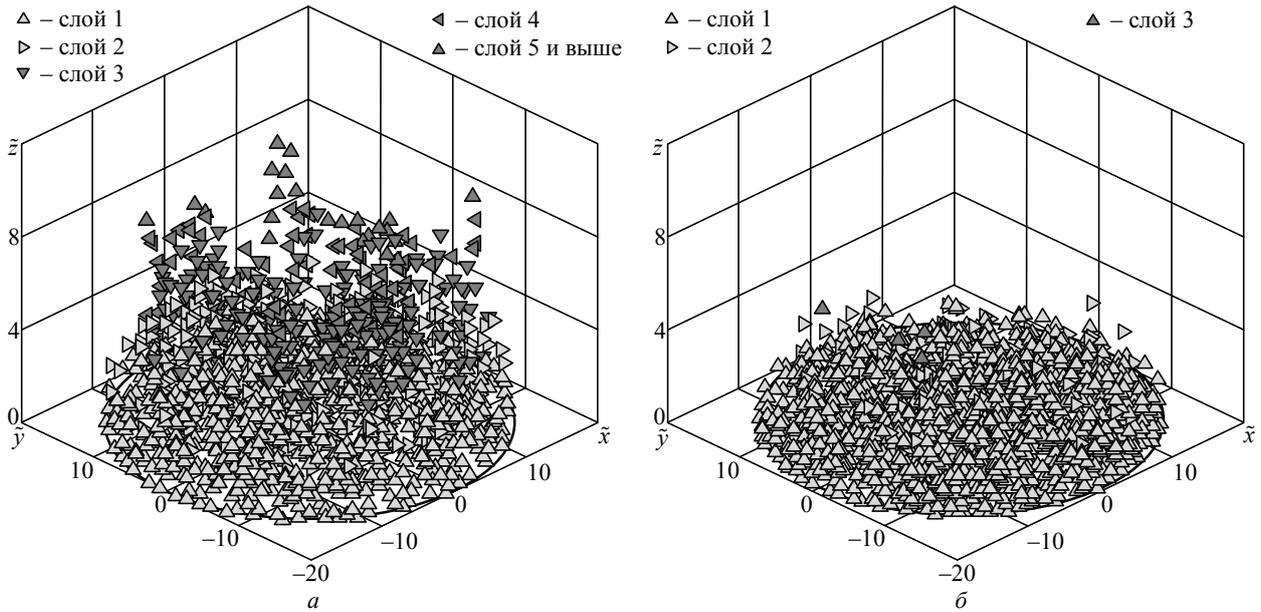


Рис. 2

При моделировании процесса роста пленки по промежуточному режиму выбор частиц, оседающих на подложку, производится методом Монте-Карло. Выбранные частицы вначале опускаются по нормали к подложке. Вблизи подложки движение определяется квазиньютоновским методом, определяющим оптимальную траекторию частицы на основе минимума потенциальной энергии системы.

Основным допущением в данной модели является учет взаимодействия между частицами на основе парного потенциала Леннарда-Джонса (ППЛД) [7], [8]. Согласно этой модели между частицами имеется два вида взаимодействия (рис. 3): на малых расстояниях преобладает сильное взаимодействие, отталкивающее частицы, на больших – слабое взаимодействие, приводящее к взаимному притяжению. В результате потенциал взаимодействия описывается следующей зависимостью:

$$U_{ij} = 4\epsilon_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right], \quad (1)$$

где ϵ_0 – глубина потенциальной ямы; r_0 – расстояние между центрами частиц, соответствующее нулевому значению ППЛД; r – расстояние между центрами частиц.

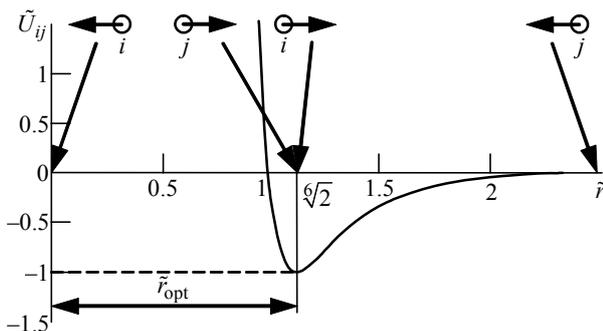


Рис. 3

трами частиц. Значения ϵ_0 и r_0 являются характеристиками атомов соответствующего вещества.

Введя нормированные величины $\tilde{U}_{ij} = U_{ij}/\epsilon_0$ и $\tilde{r} = r/r_0$, получим вид ППЛД, представленный на рис. 3. Потенциальная яма характеризуется расстоянием $\tilde{r}_{opt} = \sqrt{2}$. На расстояниях $\tilde{r} < \tilde{r}_{opt}$ $F = -d\tilde{U}/d\tilde{r} > 0$ и частицы отталкиваются, при $\tilde{r} > \tilde{r}_{opt}$ $F < 0$ – частицы притягиваются.

На всех рисунках, отображающих результаты экспериментов, размеры нормированы на оптимальное расстояние r_{opt} (рис. 3). Частицы различных типов на этих рисунках различаются по расстоянию до подложки, при переходе к следующему слою возрастающему на $(\sqrt{2}/2)r_{opt}$.

Упрощенный алгоритм моделирования процесса осаждения частиц в промежуточном режиме включает следующие итерации:

1. Выбор шага n решетки, на которой моделируется движение частиц (в экспериментах, результаты которых представлены в настоящей статье, шаг выбран равным $0.1r_{opt}$).

2. Выбор частиц случайным образом (методом Монте-Карло). Выбранные частицы последовательно выпускаются на подложку, находя себе место, определяемое по квазиньютоновскому механизму на основе минимума потенциальной энергии взаимодействия частиц.

3. Падающие частицы занимают оптимальное положение в одном из 26 возможных узлов

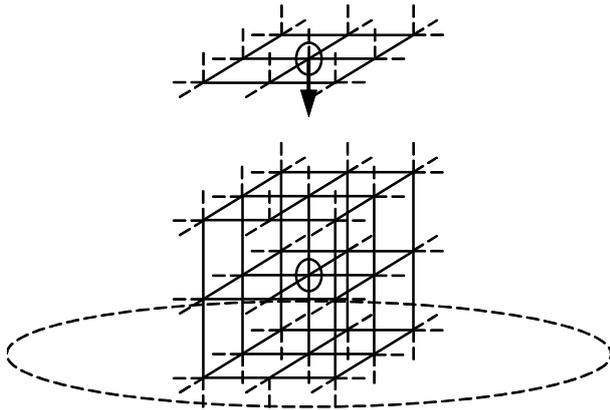


Рис. 4

решетки, окружающих частицу (8 в "нулевом" слое, в котором находится сама частица, по 9 узлов выше и ниже "нулевого" слоя, рис. 4), не занятых ранее осевшими частицами.

4. Для частицы задается максимальное количество попыток выбора оптимального положения и возможных перемещений.

5. Этапы 2–4 продолжаютя до тех пор, пока все частицы не осядут на подложку.

Для увеличения точности моделирования реального процесса роста пленки следует полнее учитывать различные условия и факторы, влияющие на качество пленки. В представленных далее компьютерных экспериментах сделана попытка учесть в алгоритме влияние на качество осаждаемой пленки начальных структур, осаждаемых на подложку, уровня взаимодействия между частицами, структуры подложки, различия напыляемых материалов и температуры подложки.

Компьютерный эксперимент 1. Анализ влияния начальных (аморфных) структур, сформиро-

ванных на подложке на первых этапах роста пленки, на последующие структуры.

В рассматриваемом эксперименте принимаются следующие допущения:

- поверхность подложки идеально гладкая;
- потенциал взаимодействия между подложкой и напыляемыми частицами, определяемый расстоянием от частиц до подложки \tilde{r} , существенно превышает связь между напыляемыми частицами;
- структура подложки не учитывается.

В условиях первого эксперимента нормированный потенциал взаимодействия частиц с подложкой определяется интегрированием ППД частицы с отдельными участками мишени. Выполнив интегрирование в пределах подложки, получим:

$$\tilde{U}_{\text{св}}(\tilde{r}) = 4\pi k \left[\frac{1}{(45\tilde{r}^9)} - \frac{1}{(6\tilde{r}^3)} \right], \quad (2)$$

где k – нормирующий коэффициент, аналогичный ϵ_0 в (1).

На рис. 5–8 отражены результаты компьютерного моделирования процесса формирования пленки в четырех следующих друг за другом моментах времени, характеризующихся увеличением вовлеченных в процесс частиц. Эксперимент проводился при связи между испаряемыми частицами, существенно меньшей связи между испаряемой частицей и подложкой (в (2) принято значение $k = 10$, при котором соотношение потенциалов связи подложки с частицами и между частицами превышает 20). Частицы, достигшие подложки, фиксируются на ней, а новые непрерывно осаждаются. На первом этапе (рис. 5) на подложку осаждалось 100 частиц, которые на последующих этапах вы-

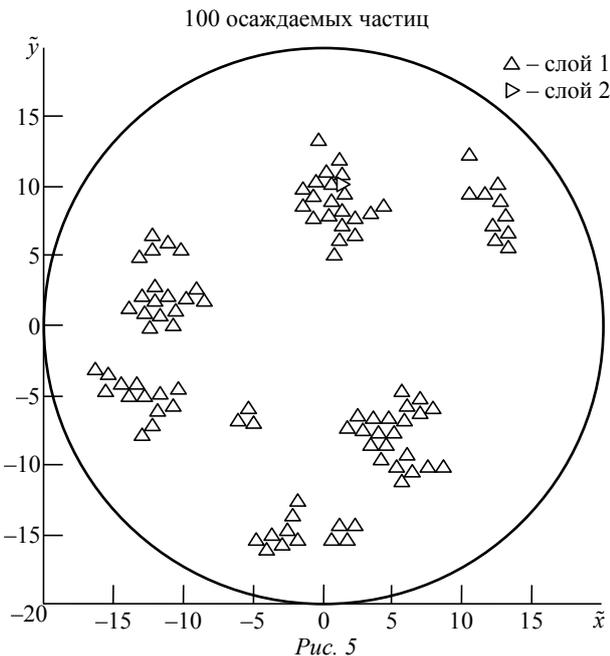


Рис. 5

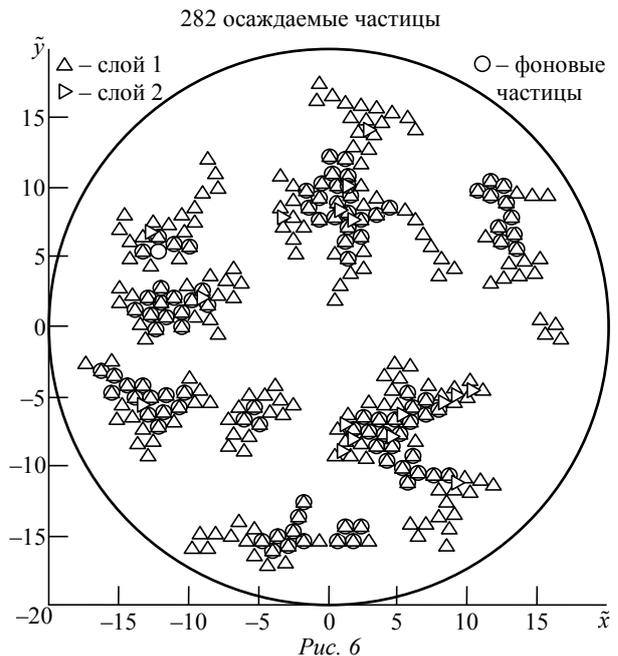


Рис. 6

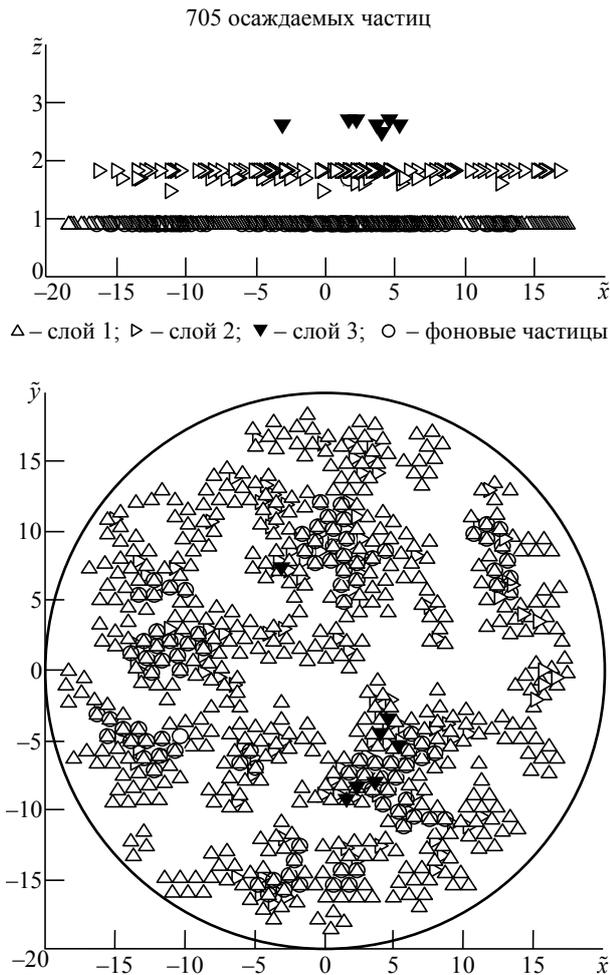


Рис. 7

полняли роль фоновых. В эксперименте оценивалось влияние структуры пленки из ранее осажденных частиц на условие осаждения последующих.

Выводы первого компьютерного эксперимента:

1. Формирование пленки происходит в послойном режиме, что соответствует механизму Франка–Ван-дер-Мерве [9]. Повышенная дефектность осажденной пленки наблюдается по периметру и в верхнем слое. Причиной этого является несбалансированное положение частиц и динамический рост дефектов на уже имеющихся дефектах.

2. Осажденные частицы располагаются на оптимальном или близком к нему расстоянии друг от друга.

3. На начальном этапе при малой толщине пленки ориентация и расположение ранее конденсированных частиц определяют направления роста последующей структуры, в результате чего образуются кластеры частиц. При сближении границ кластеров на расстояние $3r_{opt}$ и менее между ними возникает борьба за захват вновь осаждаемых частиц с последующим укрупнением кластеров.

Корректность проведенного моделирования подтверждает расположение частиц и кластеров согласно пп. 2 и 3.

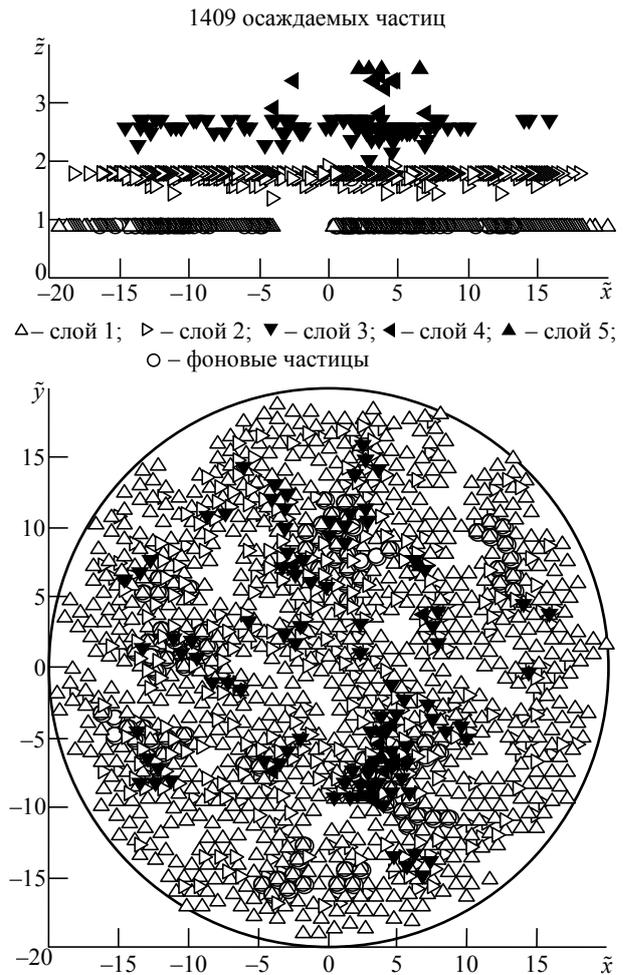


Рис. 8

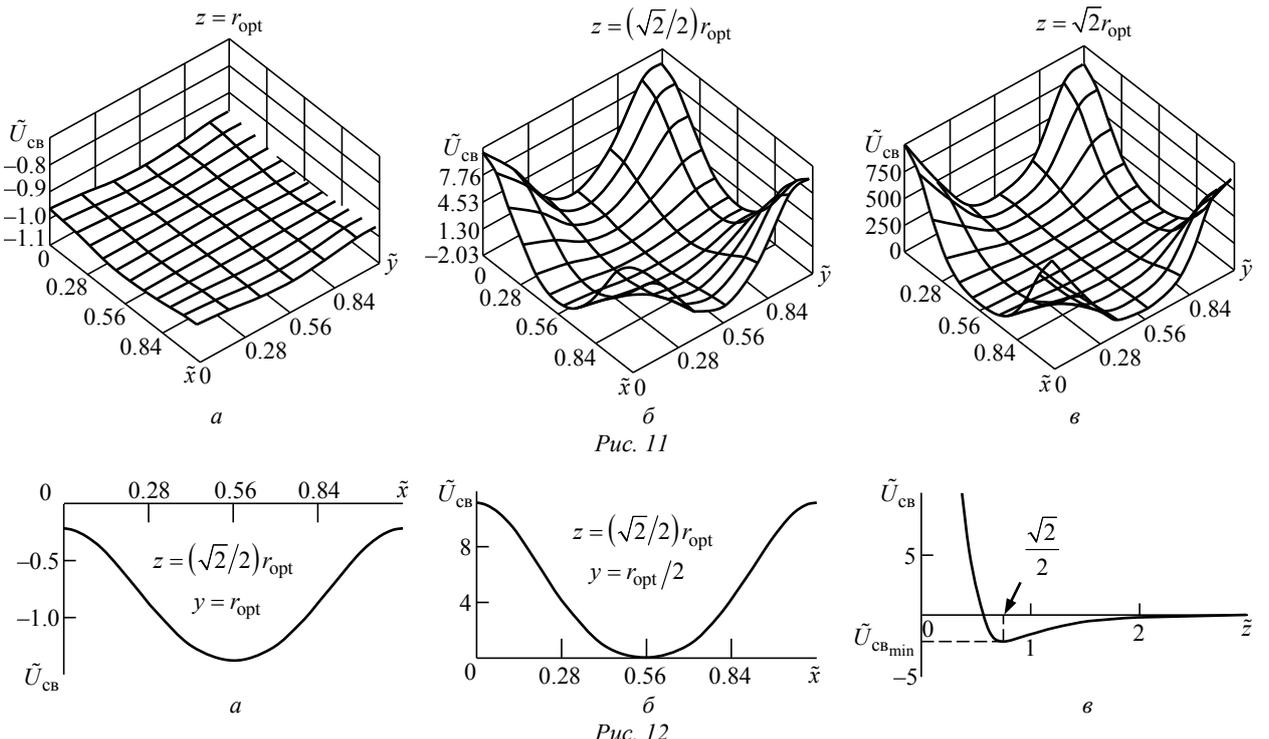
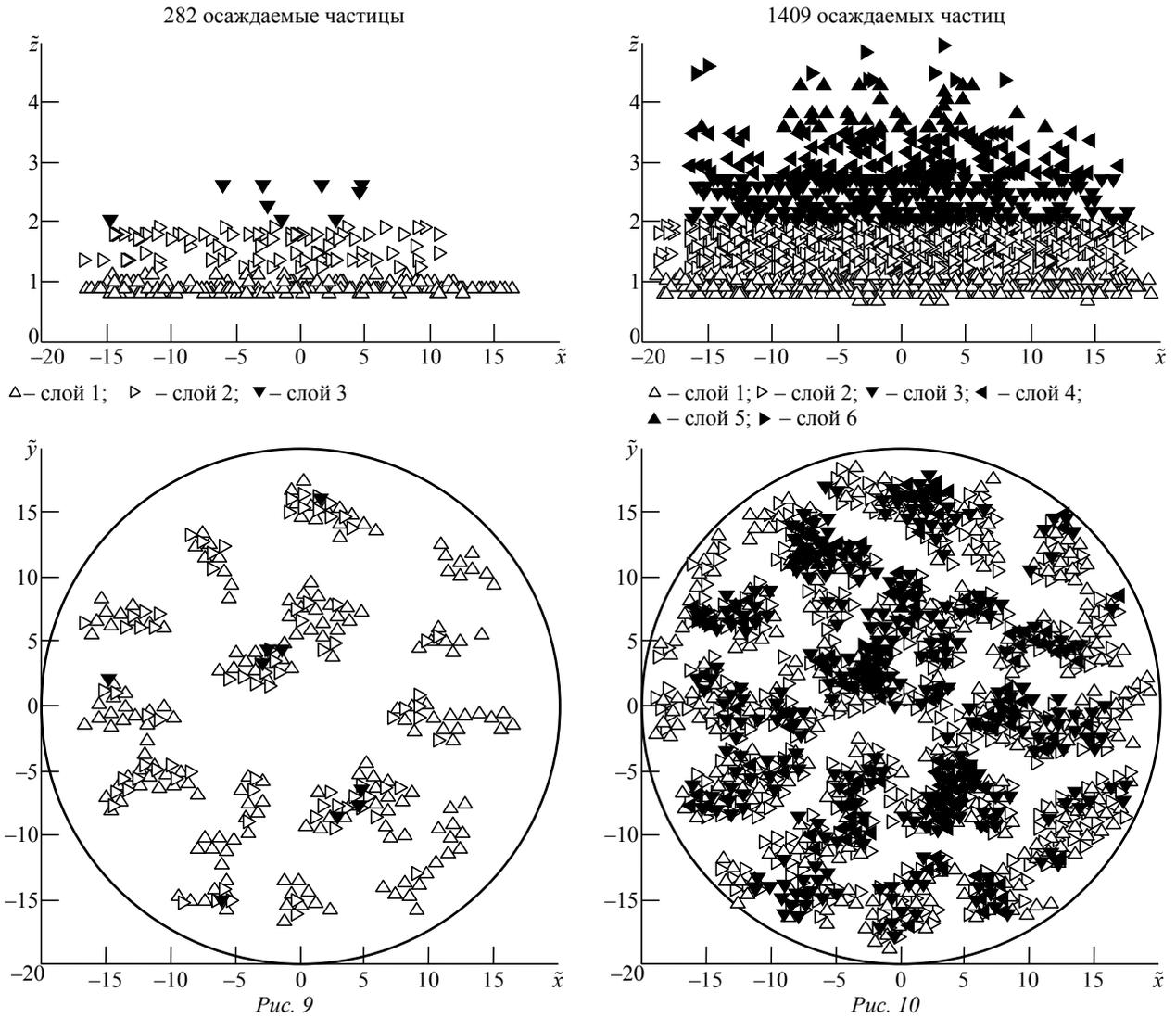
Компьютерный эксперимент 2. Анализ взаимодействия между испаряемыми частицами и испаряемой частицы с подложкой. Потенциал взаимодействия между частицами и подложкой уменьшен в 100 раз по сравнению с первым экспериментом ($k = 0.1$ в (2)). Графически результаты эксперимента представлены на рис. 9 и 10.

Совместный анализ результатов экспериментов 1 и 2 приводит к следующим выводам:

1. С возрастанием связи между частицами относительно связи между частицами и подложкой возрастает интенсивность формирования кластеров частиц, форма которых стремится к сферической.

2. Процесс осаждения частиц сохраняет свой характер, описанный в выводе 2 по первому эксперименту.

Компьютерный эксперимент 3. Анализ влияния идеальной кристаллической структуры подложки на рост тонкой пленки, кристаллическая структура которой близка к структуре подложки. В данном эксперименте под идеальной структурой подложки подразумевается объемно-центрированная структура с размерами ячейки $\tilde{x}_0 = \tilde{y}_0 =$



$= \tilde{z}_0 = r_{\text{opt}} = \sqrt[6]{2}$ и кристаллографическими углами $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Процесс носит характер эпитаксии. Глубина потенциальной ямы подложки принята $\varepsilon_{0\text{подл}} = 1$ (см. рис. 3).

На рис. 11 представлены поверхности потенциала первой частицы $\tilde{U}_{\text{св}}$ на разных расстояниях до поверхности подложки. Из приведенных диаграмм следует, что при расстоянии $z = (\sqrt{2}/2)r_{\text{opt}}$ потенциал связи в точке $x_0/2 = y_0/2$ достигает минимума $\tilde{U}_{\text{св,мин}} = -2.03$. Точка с таким значением потенциала является равновесной, в которой частица разместится с наибольшей вероятностью.

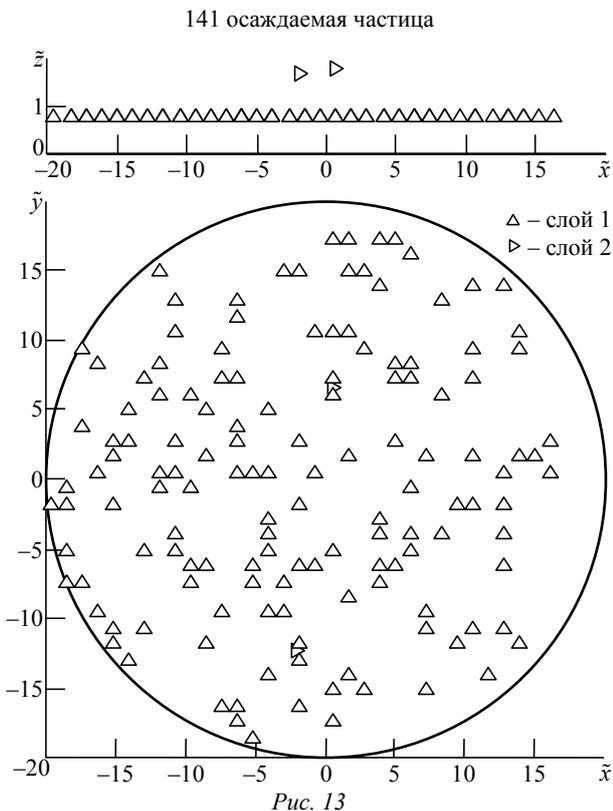
Сечения поверхности потенциала (рис. 11, б) представлены на рис. 12, а, б. Из них следует, что минимум потенциала расположен в точке

$$\tilde{x} = \tilde{y} = 0.56 = x_0/2 = y_0/2.$$

Учитывая минимум потенциала при $\tilde{z} = \sqrt{2}/2$ (рис. 12, в) получим координаты наиболее вероятного расположения первой частицы относительно подложки.

На рис. 13–16 показан результат описанного компьютерного эксперимента в разные моменты времени, различающиеся количеством осажденных частиц.

Выводы третьего компьютерного эксперимента:



1. Структура кластеров в тонкой пленке формируется под управлением потенциального барьера поверхности, который оказывает существенно большее воздействие, чем связь между частицами.

2. Процесс осаждения частиц сохраняет свой характер, описанный в выводе 2 по первому эксперименту.

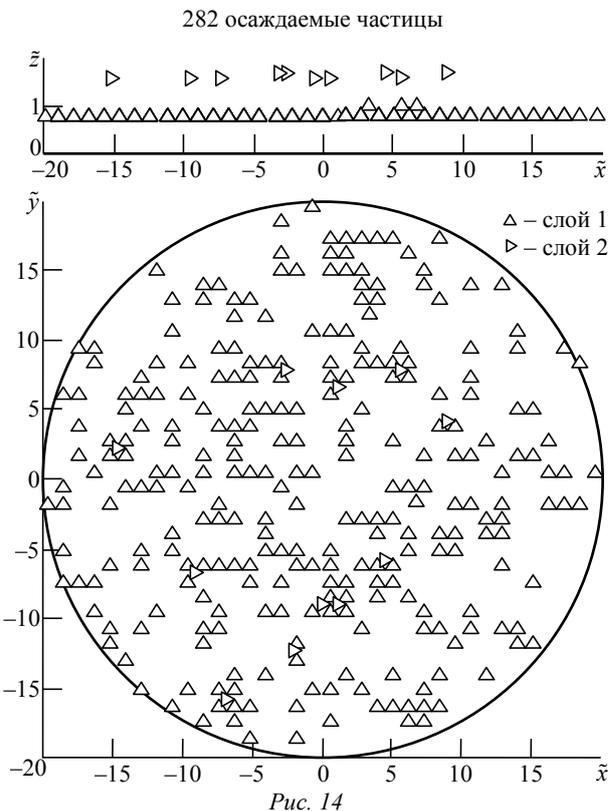
3. Как следует из рис. 12, в, оптимальное расстояние между двумя слоями $r \approx (\sqrt{2}/2)r_{\text{opt}}$.

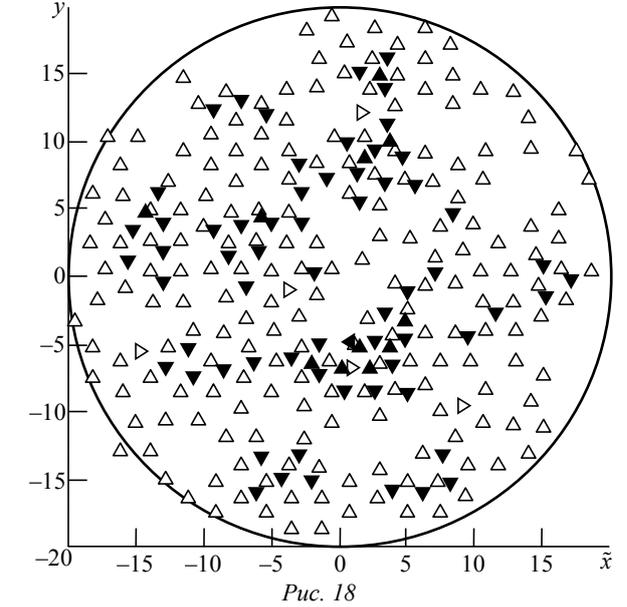
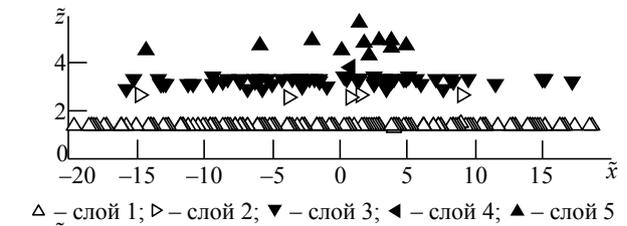
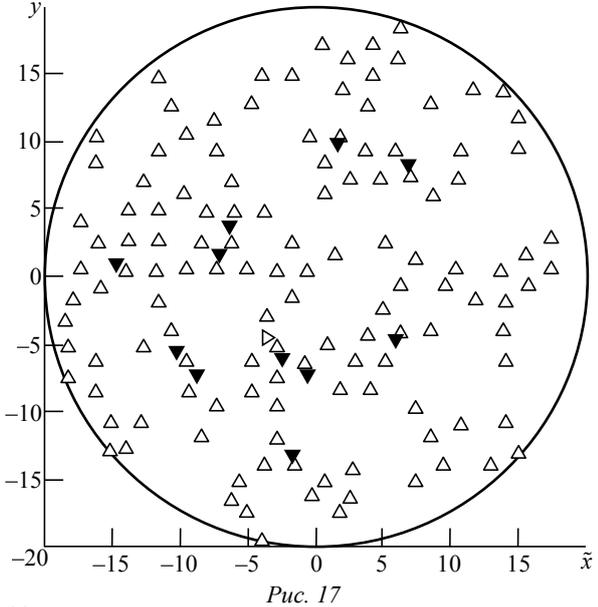
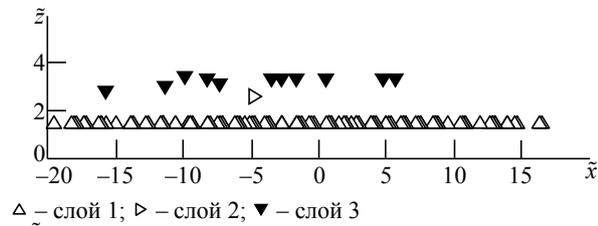
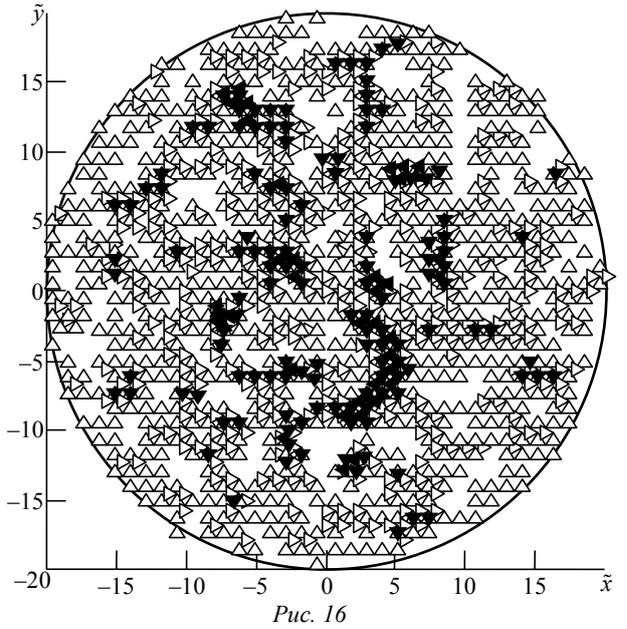
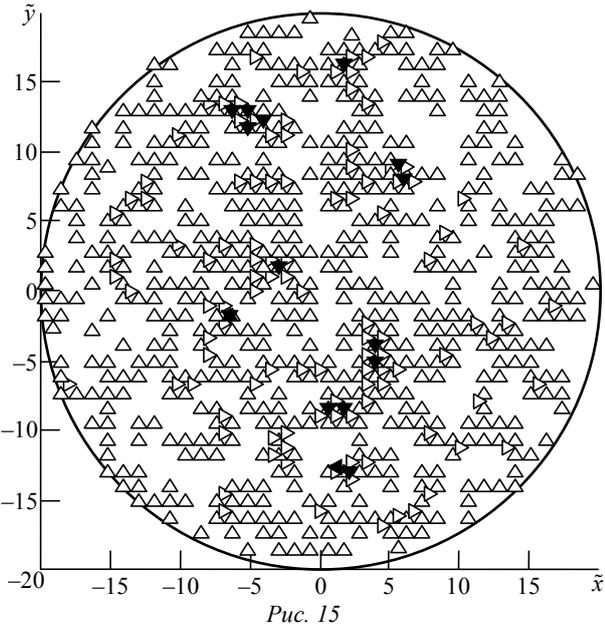
Компьютерный эксперимент 4. Анализ влияния идеальной кристаллической структуры подложки на рост тонкой пленки, кристаллическая структура которой существенно отличается от структуры подложки. В зависимости от вида испаряемых частиц и материала подложки процесс осаждения может носить различный характер. Далее приведен результат компьютерного эксперимента (рис. 17–19), в котором параметры кристаллической решетки пленки в 2 раза превышают аналогичные параметры для подложки, использованные в эксперименте 3. Потенциал связи в данной структуре в соответствии с [7], [8] определяется по (1) с вводом параметров

$$r_0 = (r_{0\text{подл}} + r_{0\text{пл}})/2 \text{ и } \varepsilon_0 = \sqrt{\varepsilon_{0\text{подл}} \varepsilon_{0\text{пл}}}.$$

Выводы четвертого компьютерного эксперимента:

1. При разнице в параметрах кристаллических решеток пленки и подложки процесс осаждения





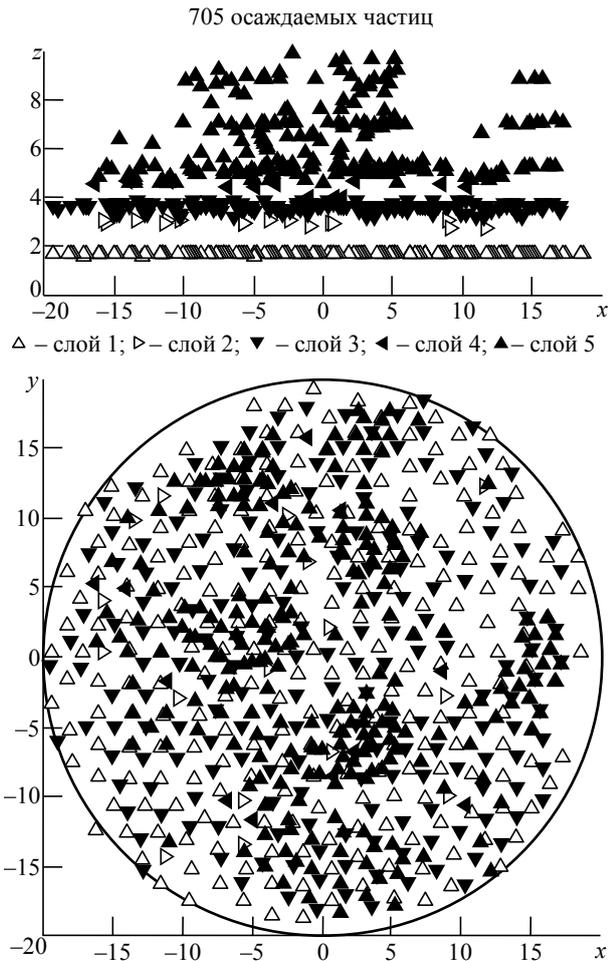


Рис. 19

не является эпитаксиальным. В процессе осаждения возникает значительно больше дефектов, чем при эпитаксиальном процессе (ср. рис. 16 и 19). В эксперименте обнаружено, что время нахождения оптимального положения осаждаемых частиц при неравенстве параметров решеток существенно больше.

2. На границе пленки и подложки возникает переходная структура.

Компьютерный эксперимент 5. Анализ влияния теплового шума на процесс роста тонких пленок и число дефектов структуры. Рассматривается нагрев подложки со спадом температуры от центра анализируемой зоны к периферии.

На рис. 20 показан результат компьютерного моделирования для подложки с неизвестной структурой (аналогично эксперименту 1). Рис. 20, а получен в отсутствие теплового шума. Энергия теплового шума для рис. 20, б приблизительно в 100 раз меньше глубины потенциальной ямы ϵ_0 для осаждаемых частиц (см. рис. 4).

На рис. 21 показан результат моделирования для подложки с известной кристаллической структурой

(аналогично эксперименту № 3). Рис. 21, а получен в отсутствие теплового шума. Энергия теплового шума для рис. 21, б примерно равна глубине потенциальной ямы ϵ_0 для осаждаемых частиц.

Выводы пятого компьютерного эксперимента:

1. С ростом теплового шума размер кластеров при неизвестной структуре подложки уменьшается, а при известной – увеличивается. В первом случае тепловой шум препятствует процессу кластеризации. Во втором случае этот шум снижает потенциальный барьер подложки, что способствует кластеризации. Следовательно, размером кластеров можно управлять, изменяя температуру процесса осаждения.

2. Чувствительность к тепловому шуму в модели с известной структурой подложки меньше, чем в модели с неизвестной структурой. При анализе процесса роста тонких пленок отмечено, что эта чувствительность возрастает при увеличении площади пленки.

3. С ростом температуры подвижность осаждаемых частиц увеличивается. Это приводит к уменьшению времени формирования кластеров и к росту количества дефектов. Степень влияния шума зависит от соотношения энергии шума и потенциальной ямы осаждаемых частиц.

В результате моделирования процесса формирования пленки на подложке выяснено, что осаждение частиц характеризуется конкуренцией процессов взаимодействия частиц между собой, а также с подложкой. Осажденная пленка представляет собой совокупность кластеров, структура которых определяется соотношением параметров кристаллических решеток пленки и подложки. Форма кластеров зависит от соотношения энергий взаимодействия между частицами пленки и частиц пленки с подложкой. Размер кластеров может регулироваться с помощью теплового воздействия на подложку в процессе осаждения. Процесс осаждения сопровождается возникновением дефектов пленки, количество которых возрастает при наличии теплового воздействия, а также по мере роста отличия параметров кристаллических решеток пленки и подложки.

Кроме факторов, рассмотренных в компьютерных экспериментах и влияющих в данной модели на качество пленки, существуют и другие, пока еще не учтенные в компьютерном моделировании факторы, например: интенсивность по-

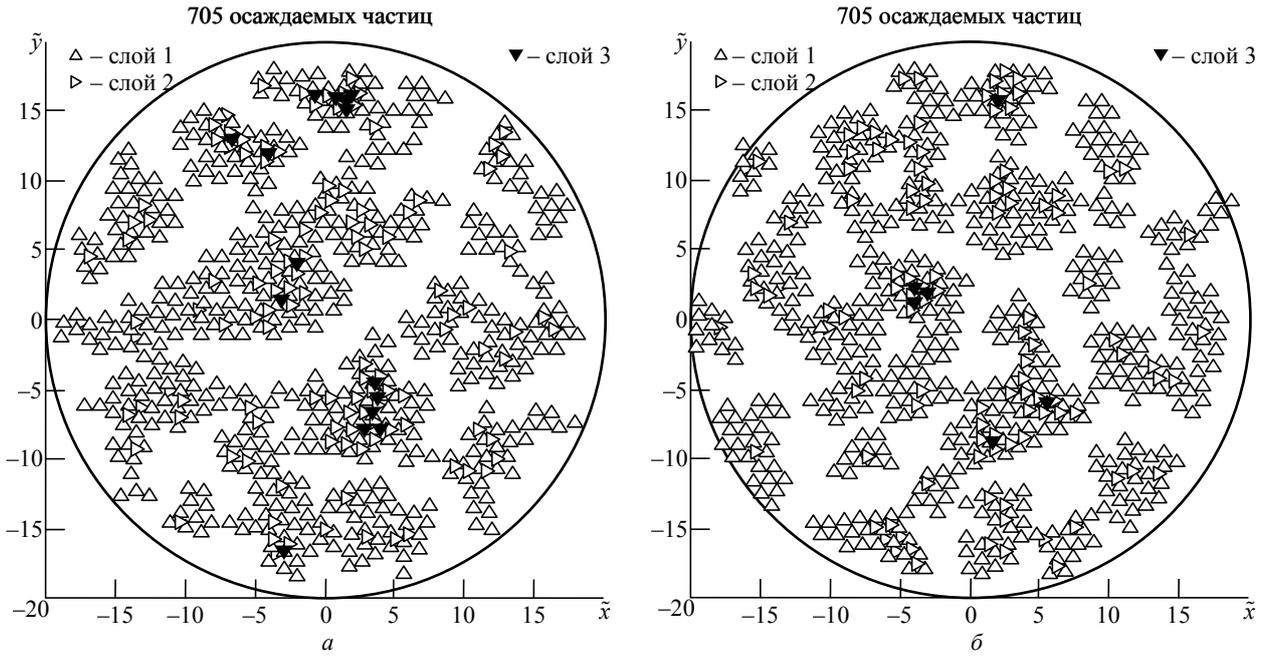


Рис. 20

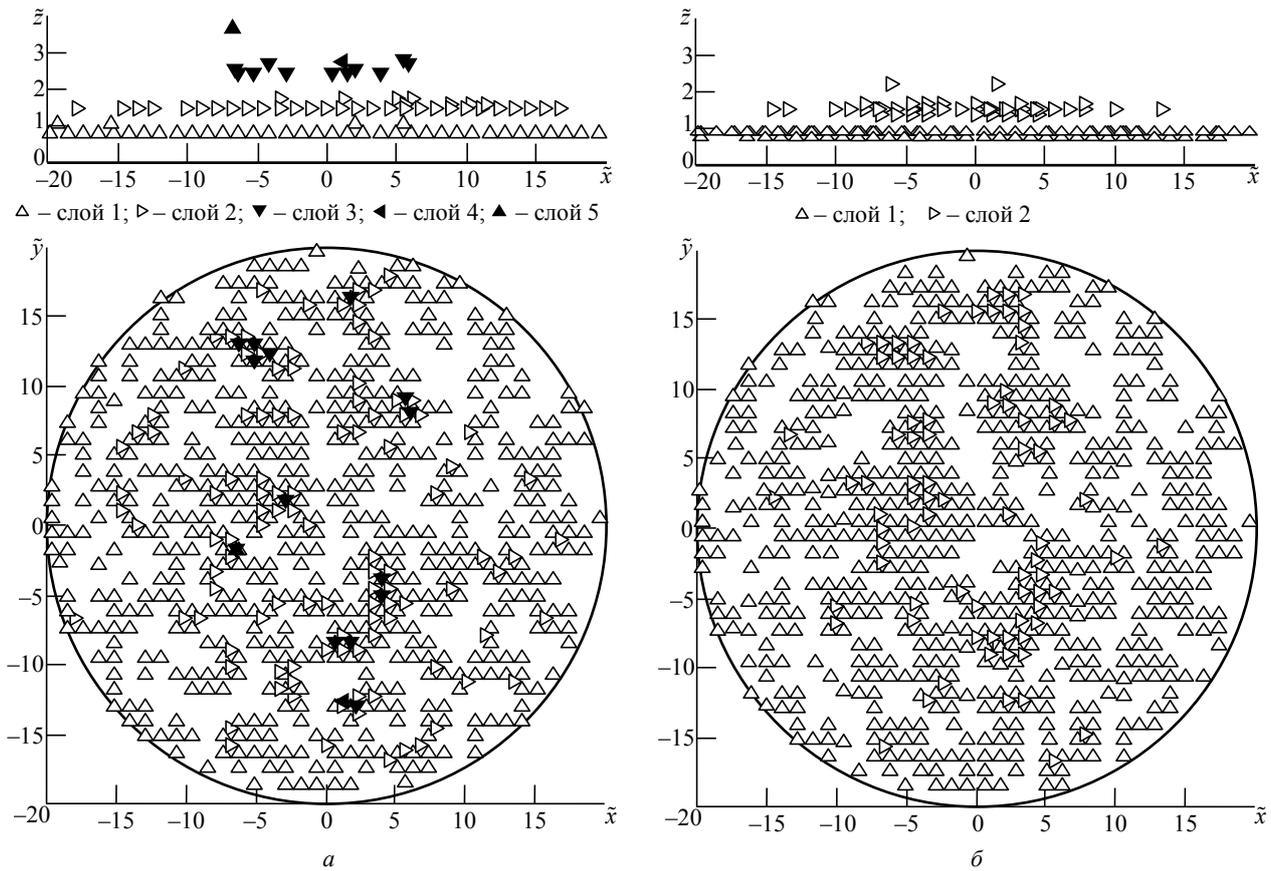


Рис. 21

тока частиц, степень активности перемещения частиц (энергия частиц) и др. Совершенствование модели [10] с целью учета указанных параметров и повышения сложности решаемых задач может быть выполнено известными методами. Оптимизация

процесса получения качественных пленок может базироваться на результате компьютерного моделирования, который позволяет учесть влияние всех отмеченных ранее факторов и оценить ожидаемую структуру формируемой пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-химические процессы синтеза наноразмерных объектов / В. А. Жабрев, В. Т. Калинин, В. И. Марголин и др. СПб.: Элмор, 2012. 328 с.
2. Компьютерное моделирование процессов синтеза наноразмерных плёнок / В. И. Марголин, Л. Ю. Аммон, Д. А. Бабичев, В. С. Фантиков, Чу Чонг Шы // Изв. Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. 2015. № 1. С. 7–13.
3. Modeling Processes of Nanoparticle Synthesis and Analyzing the Results via SEM / V. A. Zhabrev, V. I. Margolin, V. A. Tupik, Chu Trong Su // Bul. of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2015. Vol. 79, № 11. P. 1498–1500.
4. Simulating the Aggregation of Nanoparticles on a Substrate Surface upon Vacuum Deposition / V. A. Zhabrev, V. I. Margolin, V. A. Tupik, Chu Trong Su // J. of Surface Investigation, X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2015. Vol. 9, № 5. P. 877–879.
5. Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. Физические основы микроэлектроники : учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2008. 400 с.
6. Чу Чонг Шы, Бабичев Д. А. Моделирование процессов массопереноса при термическом вакуумном напылении тонких пленок // Сб. докл. 67-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава Электротехнического университета "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, 27 янв.–3 февр. 2014 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. С. 29–33.
7. Rieth M. Nano-Engineering in Science and Technology: An Introduction to the World of Nano-Design // Series on the Foundations of Natural Science and Technology. New Jersey: World Scientific, 2003. Vol. 6. 163 p.
8. Ибрагимов И. М., Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф. Основы компьютерного моделирования наносистем. СПб.: Лань, 2010. 376 с.
9. Введение в физику поверхности / К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин и др. М.: Наука, 2006. 490 с.
10. Свид. о гос. регистр. программы для ЭВМ RU 2015610052. Компьютерное моделирование процесса роста тонких пленок в потенциальном поле (Рост тонких пленок) / В. И., Марголин, Чу Чонг Шы. Опубл. 20.02.2015.

Chu Trong Su

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Computer Simulation of the Thin Film's Growth Process during Thermal Vacuum Evaporation

The various thin film growth mechanisms during thermal vacuum evaporation at atomic level are considered under different condition. Which factors and how influence on the quality of obtained thin films was demonstrated. The thin film's growth process in intermediately (Stranski-Krastanov) mode was simulated based on Monte Carlo method for determination of active particles' number, and quasi-Newtonian lattice method for determination of optimal direction of particles' motion. On this model in any given conditions the fractal growth process was analyzed. The phenomenon (opportunity) of the control and management of the growth process of thin films was considered.

Computer Simulation, Thin Film's Growth, Thermal Vacuum Evaporation, Monte Carlo Method, Lennard-Jones Potential, Fractal Structure

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2015 г.



УДК 621.391.272:621.397

Н. В. Лысенко, Н. В. Игнатьева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Спектрозональная обработка изображений в задачах экологического мониторинга

Разработаны методы описания фрагментов видеоизображений участков земной и водной поверхностей, полученных видеосъемкой с подвижного носителя. Изучены спектрозональные методы, реализующие многопрофильную обработку видеoinформации в оптическом диапазоне спектра на базе телевизионно-вычислительной системы дистанционного мониторинга, направленные на получение количественной информации о местонахождении и размерах аномальных участков поверхности воды и суши.

Обработка спектрозональной информации, признаковое пространство, оптический мониторинг, сегментация по цветности

Оптические методы мониторинга, обнаружения и классификации аномальных объектов, таких как лесные пожары и их последствия, участки засохшего леса, разливы нефти на воде, основаны на использовании закономерностей взаимодействия светового или другого электромагнитного излучения с отдельными участками контролируемого поля изображения. Электромагнитное излучение в этом случае выступает в качестве носителя информации о контролируемых объектах. Модуляция лучистого потока происходит как по энергии, так и по ее спектральному распределению и осуществляется в результате взаимодействия излучения с исследуемым веществом вследствие поглощения, отражения, рассеяния и других физических явлений. Именно эта информация и используется для решения задач мониторинга в оптических системах регистрации [1]. К числу наиболее часто используемых следует отнести метод, базирующийся на отражении электромагнитного излучения от исследуемой сцены. Объем информации, подлежащей анализу, настолько велик, что визуальные методы изучения регистрируемой картины могут удовлетворить лишь самые минимальные потребности практических задач сбора и обработки информации, особенно в реальных условиях.

Эффективное обнаружение аномальных объектов в поле изображения может быть осуществ-

лено путем регистрации изображений с использованием спектральных свойств излучения (отражения, поглощения) отдельных элементов в процессе съемки с подвижных носителей (вертолет, самолет). В таких случаях используют многозональную регистрацию пространственно-совмещенных изображений [2]. Многозональные фотографические и телевизионные системы давно применяют в биологии, астрофизике и других областях; в настоящее время их широко используют при анализе аэрокосмических снимков в интересах разведки, метеорологии и других целях [2].

Примерами многозональных сканирующих систем являются комплексы съемки поверхности Земли с аппаратов аэро- или космического базирования [3]. Принципы построения таких систем следующие. Изображение проецируется в плоскость детектора, состоящего из ряда однострочных преобразователей на базе ПЗС с числом спектральных зон регистрации Λ (обычно 4...6). Спектральные характеристики таких преобразователей вместе со светофильтрами охватывают видимый и инфракрасный диапазоны спектра. Кадровая развертка изображения осуществляется за счет непрерывного движения носителя.

Процедуры анализа определяются целевым назначением систем и, как правило, включают: выбор спектрального диапазона регистрации $\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}$, числа зон Λ , спектральных харак-

теристик чувствительности преобразователей (включая зональные фильтры) $\varepsilon_i(\lambda)$, метризацию рабочего пространства анализатора, построение решающих правил.

Формирование рабочих пространств основано на том, что для каждой функции $W(\lambda)$, отражающей спектральный состав излучения, с помощью фиксированной непрерывной финитной функции $\varepsilon_i(\lambda)$ можно найти число m_i , принадлежащее некоторому множеству M [4], [5]:

$$m_i(W, \varepsilon_i) = \int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda.$$

Так как $W(\lambda)$ – фиксированная и интегрируемая на конечном интервале функция, то в силу финитности $\varepsilon_i(\lambda)$ этот интеграл может быть взят по некоторому конечному интервалу. Если $i = 1, 2$, то функции $W(\lambda)$ можно сопоставить двумерное число $\mathbf{m}\{m_1, m_2\}$, если $i = 1 \dots 3$ – то трехмерное число $\mathbf{m}\{m_1, m_2, m_3\}$ и т. д.

Выбор конечного набора функций $\varepsilon_i(\lambda)$ приводит к классификации спектров излучений в Λ -мерном пространстве $M^\Lambda\{m_1, m_2, \dots, m_\Lambda\}$ или после нормировки по входной энергии в пространстве $M^{\Lambda-1}$ с координатами

$$\bar{m}_i = \frac{\int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda}{\sum_{i=1}^{\Lambda} \int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^{\Lambda} \int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda = m_1 + m_2 + \dots + m_\Lambda.$$

Анализ спектрально-зональных изображений может быть осуществлен методами, аналогичными используемым в колориметрии. В этом случае рабочим пространством может служить система трехзонального преобразователя изображения $M(m_1, m_2)$ – цветового пространства, где $m_1 = s_1/(s_1 + s_2 + s_3)$; $m_2 = s_2/(s_1 + s_2 + s_3)$, причем s_1, s_2, s_3 – сигналы изображения соответствующих преобразователей.

Если аппарат теории функционального анализа, базируясь на феноменологической модели цветового зрения, применить для количественного описания цветности, то функции $\varepsilon_i(\lambda)$,

$i = 1 \dots 3$, должны соответствовать кривым спектральной чувствительности глаза. Именно это позволяет построить цветное пространство, а после нормировки найти отображение на плоскости, адекватное ощущениям цветности.

Спектральные характеристики могут быть представлены и в другом рабочем пространстве, координаты которого определяются (1). В частности, Λ может иметь размерность, принятую в колориметрии $\Lambda = 3$, но при этом не накладывается особых ограничений на вид функций $\varepsilon_i(\lambda)$ и на их положение по спектру (например, они могут охватывать инфракрасную, ультрафиолетовую или другую область). Выбор Λ и функций $\varepsilon_i(\lambda)$ определяется задачами исследований или регистрации. При реализации подобного автоматического многозонального регистратора $\varepsilon_i(\lambda)$ являются спектральными характеристиками преобразователя изображения.

Рассмотрим процедуру обработки спектрально-зонального изображения на примере наиболее распространенной системы с $\Lambda = 3$. Использование описанного ранее рабочего пространства признаков позволяет сегментировать изображение по выбранным параметрам. Сегментация цветных изображений базируется на методе цветовой фильтрации [2] с помощью фильтров цветности, осуществляющих разделение пространства цветности на два подпространства: $H \subset M$ и $\bar{H} = M \setminus H$.

Введем двоичную переменную:

$$Y(m) = \begin{cases} 1, & m \in H; \\ 0, & m \notin H, \end{cases}$$

которой во временной области будет соответствовать двоичный сигнал.

Реализация и использование фильтров цветности в канале многозональной системы позволяют выделить элементы изображения, цветность которых соответствует области, заданной окном H . При этом формируется бинарный транспарант, отражающий пространственную структуру анализируемого изображения с учетом заданных цветовых характеристик. Основными характеристиками фильтра в цветовом пространстве наряду с цветовыми координатами его характерной точки m_{10}, m_{20} являются форма границы и размеры окна. Границы H определяются конкретной задачей анализа с учетом статистики распределения цветности в исследуемых изображениях.

К наиболее простым техническим решениям приводят методы классификации, использующие

линейные решающие правила. К их числу относится формирование прямоугольного окна на плоскости цветовой диаграммы рабочего пространства. Двухзначный предикат $Y(m)$ для прямоугольного окна цветности имеет вид

$$Y(m) = \bigcap_{i=1}^4 Y_i(m) = \left[(a_{11}m_1 + a_{12}m_2 + a_{13} > 0) \wedge \right. \\ \left. \wedge (a_{21}m_1 + a_{22}m_2 + a_{23} > 0) \wedge \right. \\ \left. \wedge (a_{31}m_1 + a_{32}m_2 + a_{33} > 0) \wedge \right. \\ \left. \wedge (a_{41}m_1 + a_{42}m_2 + a_{43} > 0) \right] = 1,$$

где $Y_i(m)$ – решающие двухзначные предикаты, соответствующие четырем прямым, ограничивающим окно; $[\cdot]$ – отображение, которое ставит в соответствие истинным значениям предиката $Y(m)=1$, а ложным – $Y(m)=0$; a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , ... – коэффициенты, определяющие положение прямых, которые могут быть определены через координаты вершин окна m_a , m_b , m_c , m_d .

Дискретное сканирование рабочего пространства с помощью фильтра цветности с прямоугольным окном позволяет оценить статистические свойства изображений, в частности их цветное содержание, построением двумерной гистограммы цветности или ее отображения на цветовой диаграмме, называемого цветовым охватом. Цветовой охват представляет информативную область, в пределах которой локализованы возможные для данного класса изображений значения цветности. Его можно использовать в качестве признака при распознавании аномальных областей в процессе экологического мониторинга.

Изучение цветовых (трехзональных) характеристик с целью обнаружения областей с нарушениями экологического баланса природной среды, наблюдаемой через толщу атмосферы (аэрокосмическая съемка), и в других целях указывает на существенное влияние на спектральные характеристики (в частности, цвет) объектов оптических свойств среды, расположенной между исследуемыми объектами и телевизионной системой, изменение условий освещения (непостоянство во времени спектрального состава и нестабильность светового потока источника освещения) и др. [6]. Нестабильность сигналов на выходе преобразователей изображений является следствием временной нестабильности и шумов цветоделенных каналов и других побочных факторов. В процессе автоматической классификации с использованием

цвета или спектральных компонентов в качестве признаков вследствие указанных причин появляются ошибки в классификации [7].

Связь между свойствами рабочего пространства анализатора и физическими характеристиками изучаемых сцен определяется характеристиками для каждой конкретной системы. Уменьшение ошибок в процессе анализа достигается расширением набора признаков, разработкой аппаратно-программного обеспечения поисковых систем обнаружения проявления аномальных явлений, а также оптимизацией спектральных характеристик каналов преобразователя $\varepsilon_i(\lambda)$ [8].

Среди признаков, обеспечивающих многопараметрическую обработку изображений, особо важное место занимают яркостные, цветовые, геометрические и текстурные. Целесообразность использования текстурных признаков в задачах экологического мониторинга не вызывает сомнения, поскольку изображения, зарегистрированные техническими средствами дистанционного типа, как правило, относятся к классу текстурных [9]. Эффективность применения текстурной сегментации подтверждена экспериментальными исследованиями [10]. Использование цветовой фильтрации изображений позволяет свести процедуру анализа спектрально-цветных или цветных изображений к известным алгоритмам исследования геометрических характеристик: распределений фрагментов изображений:

- по размерам, площадям, периметрам и другим топологическим характеристикам;
- порядку узловых точек;
- связности;
- скоростям и направлениям движения.

Использование многопрофильной обработки информации за счет создания расширенной базы признаков описания анализируемой поверхности обеспечивает получение системно организованной и достоверной информации о состоянии природной среды в условиях экологических катастроф [11]. Развитие современных информационных технологий анализа и обработки изображений позволяет реализовать сопряженный (наземно-аэрокосмический) экологический мониторинг природной среды.

Методы классификации цветных изображений аномалий включают процедуры вычисления информативных признаков, обучение, классификацию и постобработку. В качестве первичных признаков выбираются координаты цветности изображений. В процессе обучения формируются статистические модели классов изображения, основанные либо на распределениях плотности вероятности классов,

либо на наборах их статистических параметров. Наборы параметров, которые называют вторичными признаками, содержат сведения о векторе средних значений и ковариационной матрице класса.

Обучение включает следующие процедуры:

- выбор статистически однородных фрагментов цветных изображений;
- определение фрагментов, входящих в обучающую последовательность;
- получение оценок вероятности ошибок для заданного классификатора по обучающей выборке данных;
- изучение возможностей использования цветных параметров, полученных при обучении, на иные изображения, разделенные во времени и(или) в пространстве.

Вычисленные на этапе обучения характеристики используются для нахождения решающих функций, с помощью которых определяется принадлежность наблюдаемого изображения к тому или иному классу. Тем самым на цветовой диаграмме формируется область, форма которой наилучшим образом согласована с цветовым охватом наблюдаемого класса изображения.

При определении цветового охвата на стадии обучения создается двумерная гистограмма цветности, для чего подсчитывается количество элементов изображения, цветность которых совпадает с параметрами окон цветности. Размеры этого окна и его местоположение можно изменять в пределах всего цветового пространства. Далее применяется один из алгоритмов сегментации. Сегментация разделяет изображение или объекты сцены на смысловые части, статистически однородные по отношению к информативным признакам – координатам цветности. Обычно сегментация основывается на двух подходах: пороговой обработке и кластеризации. Хорошие результаты могут быть получены при кластеризации двумерной гистограммы цветности. В результате такой процедуры в собственную область класса включается проекция гистограммы на цветовой график, причем используются только те значения гистограммы, которые превышают некоторый порог. Значение порога выбирается эмпирически и обычно составляет 1–10 % от максимального значения гистограммы. Такое пороговое ограничение позволяет отсеять случайные и малоинформативные отсчеты, попадающие в обучающую выборку.

После принятия решения о наличии искомого класса в изображении выполняется постобработка последнего, включающая две процедуры.

Первоначально элементы, определенные как принадлежащие анализируемому классу изображений, подсвечиваются на экране монитора определенным (например, голубым) цветом (на приведенных в настоящей статье монохромных иллюстрациях – серым тоном), что позволяет визуально наблюдать всю обнаруженную область в исследуемом изображении. Затем вычисляются площади исследуемого изображения и области, принадлежащей анализируемому классу. Определяется доля наблюдаемого изображения, отнесенная к обнаруженной области (результат выводится на экран монитора в процентах).

При последующей детализации для выделенного методом цветовой фильтрации изображения возможно выделение различающихся по текстуре участков (например, характеризующих степень зараженности лесных массивов, старый и молодой лес и т. д.). Для этого целесообразно применять методы, основанные на анализе пространственной взаимосвязи элементов изображений [10].

Описанная процедура цветовой фильтрации позволяет обнаруживать и выделять изображения полей, лесов, водные районы, отличать зараженные леса, лесные пожары и загрязненные участки воды.

Описанные методы иллюстрируются далее результатами обработки изображений лесных массивов и загрязненных водных поверхностей с помощью программы, написанной на языке программирования C++ и предназначенной для работы в среде MS WINDOWS.

Фотоизображения лесных массивов (рис. 1) условно можно разделить на две группы: старые горелые леса (2–3-годовой давности) (рис. 1, *a*) и лес, засохший в результате действия низового лесного пожара, кислотных дождей, или жизнедеятельности насекомых-вредителей (рис. 1, *в*). Результат сегментации по цветности изображения рис. 1, *a* представлен на рис. 1, *б*, аналогичный результат для рис. 1, *в* – на рис. 1, *г*.

При обработке изображений лесных пожаров и их последствий установлено, что обнаружение и сегментация участков поврежденных изображений лесных массивов дали хорошие результаты. Хотя на участках, пораженных пожаром 2–3 года тому назад, появились молодые зеленые растения, в целом такие участки хорошо поддаются сегментации по цветности. Значимые результаты получены при сегментации участков леса, засохшего, по-видимому, после прохождения низового пожара или кислотного дождя. Эти участки желто-коричневого цвета были выделены на фоне зеленого неповрежденного леса.

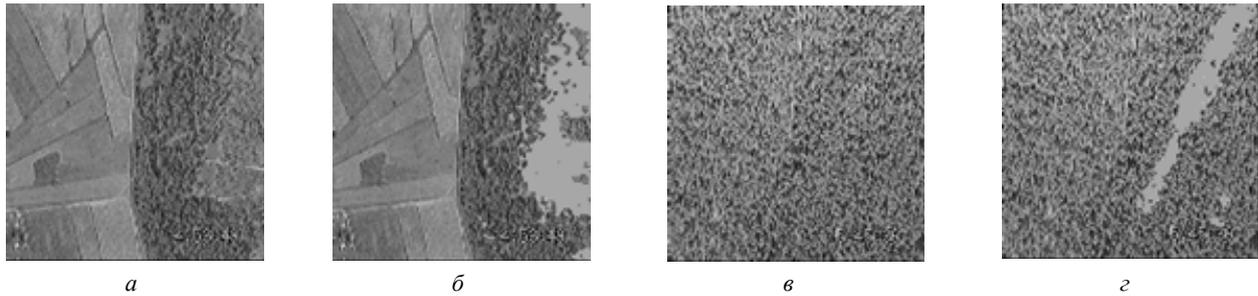


Рис. 1

Исследования разработанных методов проводились на отснятом с помощью телевизионной поисковой системы видеоматериале. В частности, в результате обработки отснятого видеоматериала на телевизионно-вычислительном комплексе методом цветовой фильтрации изображений надежно обнаружены нефтяные загрязнения (рис. 2, 3).

На рис. 2 приведено исходное изображение порта с нефтяными загрязнениями (а), его проекция на карту (б) и признаковое пространство в виде цветовой диаграммы (в). На изображении видно пятно в виде потока, тянущегося от берега в сторону открытой воды (рис. 2, а, 1). Рис. 3 отображает результаты сегментации: изображения выделенных нефтяных загрязнений (рис. 3, а, 1 и соседние области) и отображение результатов сегментации на цветовой диаграмме (рис. 3, в). Из сравнения рис. 2 и 3 следует, что обнаружены и выделены изображения нефтяных пятен, а также измерена доля загрязненной акватории (выведена под обработанным изображением, рис. 3, а). Изображения спроектированы на электронную карту местности (рис. 2, б и 3, б).

Для систематизации полученных результатов и их хранения создана база экологических данных, состоящая из изображений аномалий и их параметров. База разработана с помощью языка

программирования Delphi и предназначена для работы в среде MS WINDOWS. Для каждого занесенного в базу объекта в ней хранится следующая информация:

- название вида аномалии;
- координаты широты и долготы (градусы, минуты, секунды);
- дата и время видеосъемки;
- вид изображения (оригинальное, обработанное);
- доля выделенного изображения аномалии (в процентах от всего изображения);
- изображение аномальной зоны.

В основу алгоритмической обработки спектральной информации положены методы представления спектральных характеристик исследуемых изображений в трехмерном признаковом пространстве и сегментации элементов изображений по цветовым признакам. В целом программное обеспечение служит для обнаружения, сегментации, измерения площадей и картографирования цветных изображений аномальных областей (нефтяные и другие виды загрязнения на воде, пожары и их последствия на суше и т. д.) для решения задач экологического мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

Разработанные методы описания фрагментов видеоизображений участков земной и водной по-

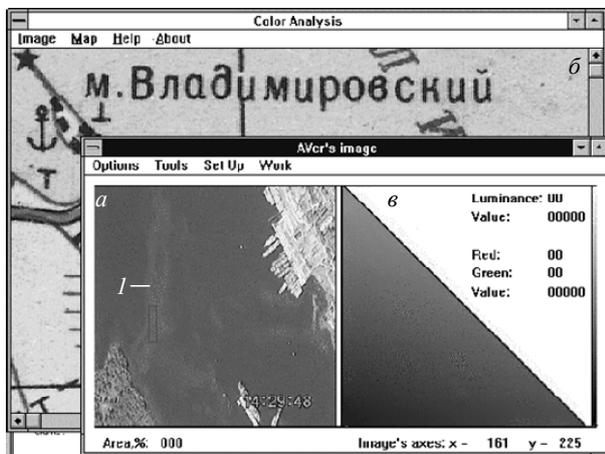


Рис. 2



Рис. 3

верхностей и спектрзональные методы, реализующие многопрофильную обработку видеoinформации в оптическом диапазоне спектра на ба-

зе системы дистанционного мониторинга, подтвердили их эффективность при решении задач экологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В. Спектральные свойства изображений как информативный признак в задачах экологического мониторинга // *Материалы Междунар. конф. "Критерии экологической безопасности"*. Санкт-Петербург, окт. 1994 г. С. 163.

2. Природные катастрофы и окружающая среда / В. Г. Бондур, В. Ф. Крапивин, И. И. Потапов, В. Ю. Солдатов // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2012. № 1. С. 3–160.

3. Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Потапов И. И. Развитие технологии диагностики лесных экосистем // *Экологическая экспертиза*. 2012. № 3. С. 3–16.

4. Игнатъева Н. В., Титов Ю. М., Федченков К. А. Цветовая фильтрация в цветковых телевизионных системах // *Изв. вузов. Приборостроение*. 1980. Т. 23, № 9. С. 72–76.

5. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В., Титов Ю. М. Телевизионные методы цветовой фильтрации в аэрокосмических исследованиях Земли // *Исследование Земли из космоса*. 1981. Т. 2. С. 76–81.

6. Беляев А. Ю., Быков Р. Е., Игнатъева Н. В. Инвариантные к источнику освещения алгоритмы анализа цветных изображений // *Материалы Междунар. конф. "Телевидение: передача и обработка изобра-*

жений", Санкт-Петербург, 25, 26 июня 2000 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2000. С. 90–92.

7. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ, 2009. 763 с.

8. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В., Сладков А. Ю. Технические средства контроля водных поверхностей // *Человек и море / СПбГЭТУ (ЛЭТИ)*. СПб., 1994. С. 74–79. (Изв. ГЭТУ. Спец. вып.).

9. Медведева Е. В. Сегментация изображений в мониторинговых системах // XVI МНТК "Радиолокация, навигация, связь", Воронеж, 13–15 апр. 2010 г.: сб. докл. / ООО НПФ "САКВОЕЕ". Воронеж, 2010. Т. 1. С. 231–238.

10. Игнатъева Н. В., Коржик Ю. В. Метод оперативной сегментации цветных текстурных изображений // *Матер. Междунар. симпозиума "Методы и средства мониторинга состояния окружающей среды"*, Санкт-Петербург, 25–28 апр. 1995 г. / СПбГЭТУ (ЛЭТИ). СПб., 1995. С. 21–23.

11. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В., Сладков А. Ю. Обработка видеoinформации в задачах экологического мониторинга // *Обработка сигналов в радиотехнических и телевизионных устройствах и системах*. 1994. С. 58–61. (Изв. ГЭТУ. Вып. 473).

N. V. Lysenko, N. V. Ignatieva

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Multispectral image processing in problems of ecological monitoring

The methods developed for the description of fragments of video images of the earth's and water surfaces obtained by means of video recording with a moving carrier. Studied multispectral methods that implement multi-processing of video information in the optical spectrum on the basis of a television system remote monitoring aimed at obtaining quantitative information on the location and size of the anomalous areas of surface water and land.

Multispectral Information Processing, Feature Space, Optical Monitoring, Segmentation by Color

Статья поступила в редакцию 24 октября 2016 г.



УДК 621.396.988.1

В. К. Орлов, В. С. Рамаданов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Коррекции относительных координат по дальности по методу максимального правдоподобия

Выведен алгоритм оценки максимального правдоподобия для измерений относительных координат и дальности, позволяющий наиболее эффективно использовать разнородные источники данных. Точность полученного алгоритма исследована двумя способами: аналитически и численным моделированием. Приведена область применимости аналитических выкладок, построен координатный фильтр, реализующий разработанную оценку.

Оценка максимального правдоподобия, информационная матрица Фишера, комплексирование навигационной информации, коррекция относительных координат

В задачах относительной навигации (ОН) требуется определять положение объектов друг относительно друга. Для получения данных о взаимном положении применяются два вида источников информации [1]. Первые выдают навигационные данные в абсолютных системах координат, связанных с Землей. К таким источникам относятся бортовые инерциальные навигационные системы (БИНС) и спутниковые радионавигационные системы (СРНС). Информацию о взаимном положении из абсолютных координат можно получить с помощью вычитания координат потребителей друг из друга. Другой тип источников дает информацию о взаимном положении. К ним относятся дальномеры, инфракрасные пеленгаторы, бортовые радиолокационные станции. Каждый из таких источников имеет свои достоинства и недостатки, определяющие его область применения.

В настоящей статье ограничимся рассмотрением вопросов оптимального комплексирования источников из первой группы с дальномерами. Критерием оптимальности будет являться минимум дисперсии оценки относительного положения при условии ее несмещенности. При отсутствии априорных данных об измеряемых величинах наилучшие результаты дают оценки максимального правдоподобия (МП) [2], поэтому рассмотрим именно этот класс оценок.

Вывод правила оценивания. Для наглядности и простоты интерпретации математических выкла-

док рассмотрим случай, когда координаты точки M x_M , y_M и дальность до нее D измеряются на плоскости (рис. 1). В результате измерений получено положение точки M_α , характеризующее измерениями координат α_x , α_y и дальности α_D . После обработки результатов измерений формируется оценка положения точки \hat{M} с оценками координат \hat{x}_M , \hat{y}_M и дальности \hat{D} . Как будет показано далее, этот случай легко можно распространить и на измерения в трехмерном пространстве.

Для синтеза алгоритма примем, что шумы измерений независимы, распределены нормально с нулевым математическим ожиданием (МО) и известными дисперсиями.

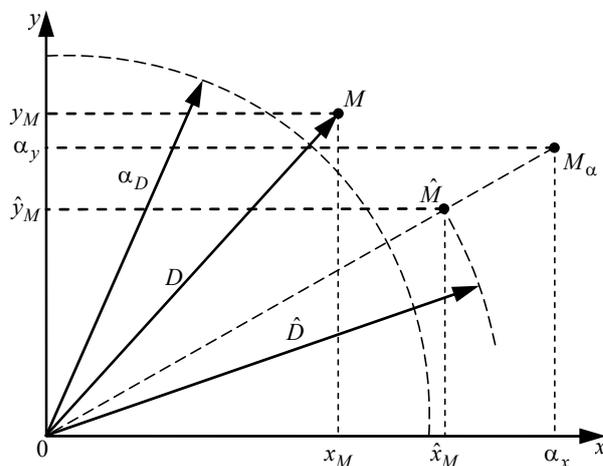


Рис. 1

Для математического описания оптимальной оценки необходимо задать вектор состояния системы:

$$\boldsymbol{\theta} = [x_M \ y_M \ D]^T, \quad (1)$$

где "Т" – символ транспонирования.

Так же можно получить расчетную дальность до точки, зная ее относительные координаты:

$$d = \sqrt{x_M^2 + y_M^2}. \quad (2)$$

При этом $D = d$, что служит основанием построения совместной оценки.

Вектор наблюдения содержит результаты измерения элементов вектора состояния системы:

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_D]^T,$$

где α_x , α_y , α_D – результаты измерения величин x_M , y_M и D соответственно.

Правило МП основано на максимизации функции правдоподобия (ФП) $\ln p_{\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\theta}}$ по вектору состояния при фиксированном векторе наблюдения [2]:

$$\ln p_{\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\theta}} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=\hat{\boldsymbol{\theta}}} \rightarrow \max.$$

За оценку МП принимается вектор состояния $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{x}_M \ \hat{y}_M \ \hat{D}]^T$, при котором ФП достигает максимума.

Запишем условную плотность вероятности элементов вектора результатов измерений $\boldsymbol{\alpha}$ при условии, что истинные значения измеряемых величин равны элементам вектора $\boldsymbol{\theta}$:

$$p_{\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\theta}} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \det(K)}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{z} - \boldsymbol{\theta})^T K^{-1}(\mathbf{z} - \boldsymbol{\theta})\right\}, \quad (3)$$

где K – корреляционная матрица шумов измерений. Для рассматриваемого случая измерений на плоскости матрица K имеет вид

$$K = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_D^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где σ_x , σ_y , σ_D – среднеквадратические отклонения (СКО) измерений составляющих вектора $\boldsymbol{\theta}$.

При синтезе алгоритма оценки взаимной корреляцией между измерениями пренебрегаем.

Для получения правила оптимального оценивания необходима ФП для вектора $\boldsymbol{\theta}$ при наличии вектора $\boldsymbol{\alpha}$, которая в рассматриваемом случае может быть получена подстановкой (4) в (3) и логарифмированием последнего выражения:

$$\ln p_{\boldsymbol{\alpha}|\boldsymbol{\theta}} = \ln \left[\frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sigma_D (\sqrt{2\pi})^3} \right] - \frac{1}{2} \left[\frac{(\alpha_x - x_M)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(\alpha_y - y_M)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(\alpha_D - D)^2}{\sigma_D^2} \right]. \quad (5)$$

Максимизацию полученной ФП необходимо проводить с учетом связи между элементами вектора состояния (2). Постоянное смещение не влияет на результат максимизации, поэтому первое слагаемое в (5) можно исключить из рассмотрения. Избавившись от множителя $(-1/2)$, сведем задачу отыскания МП-оценки к поиску условного минимума выражения:

$$\begin{cases} \frac{(\alpha_x - \hat{x}_M)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(\alpha_y - \hat{y}_M)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(\alpha_D - \hat{D})^2}{\sigma_D^2} \rightarrow \min; \\ \hat{z}_x^2 + \hat{z}_y^2 = \hat{D}^2. \end{cases}$$

Задача условной минимизации ФП может быть решена различными методами. Наиболее привлекательным с точки зрения снижения сложности вычислений является метод неопределенных множителей Лагранжа [3]. Запишем граничное условие:

$$\varphi(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = \hat{x}_M^2 + \hat{y}_M^2 - \hat{D}^2 = 0 \quad (6)$$

и функцию Лагранжа:

$$\Phi(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \lambda) = \frac{(\alpha_x - \hat{x}_M)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(\alpha_y - \hat{y}_M)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(\alpha_D - \hat{D})^2}{\sigma_D^2} + \lambda \varphi(\hat{\boldsymbol{\theta}}). \quad (7)$$

Оптимальная оценка по методу МП будет корнем системы уравнений:

$$\begin{cases} d[\Phi(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \lambda)]/d\hat{x}_M = 0; \\ d[\Phi(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \lambda)]/d\hat{y}_M = 0; \\ d[\Phi(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \lambda)]/d\hat{D} = 0; \\ \varphi(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Подставив в систему (8) функцию Лагранжа (7), получим:

$$\begin{cases} -(\alpha_x - \hat{x}_M)/\sigma_x^2 + \lambda \hat{x}_M = 0; \\ -(\alpha_y - \hat{y}_M)/\sigma_y^2 + \lambda \hat{y}_M = 0; \\ -(\alpha_D - \hat{D})/\sigma_D^2 - \lambda \hat{x}_M = 0; \\ \hat{x}_M^2 + \hat{y}_M^2 - \hat{D}^2 = 0, \end{cases}$$

откуда получим выражения для искомым элементов вектора оценок:

$$\begin{cases} \hat{x}_M = \alpha_x / (1 + \sigma_x^2 \lambda); \\ \hat{y}_M = \alpha_y / (1 + \sigma_y^2 \lambda); \\ \hat{D} = \alpha_D / (1 - \sigma_D^2 \lambda); \\ \hat{x}_M^2 + \hat{y}_M^2 - \hat{D}^2 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Параметр λ определим подстановкой верхних трех уравнений системы (9) в нижнее:

$$\frac{\alpha_x^2}{(1 + \sigma_x^2 \lambda)^2} + \frac{\alpha_y^2}{(1 + \sigma_y^2 \lambda)^2} - \frac{\alpha_D^2}{(1 - \sigma_D^2 \lambda)^2} = 0. \quad (10)$$

Полученное уравнение может быть сведено к обычному алгебраическому степенному уравнению (СУ), степень которого зависит от количества принятых различными СКО ошибок. При равных СКО измерений координат ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$) степень СУ равняется 2, при различных СКО составляет 4.

Как следует из уравнения (10), оптимальная оценка вектора θ нелинейна, поскольку параметр λ является нелинейной функцией от вектора измерений \mathbf{a} . Оценка n -го элемента вектора состояния может быть определена следующим образом:

$$\hat{\theta}_n = \frac{\alpha_n}{1 + \sigma_n^2 \lambda(\mathbf{a})} = \Theta_n(\mathbf{a}). \quad (11)$$

Рассмотрим подробно случай $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$. Уравнение (10) относительно параметра λ сводится к форме

$$(\alpha_x^2 + \alpha_y^2)(1 - \sigma_D^2 \lambda)^2 - \alpha_D^2 (1 + \sigma^2 \lambda)^2 = 0,$$

откуда

$$\pm \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} (1 - \sigma_D^2 \lambda) = \pm \alpha_D (1 + \sigma^2 \lambda).$$

Решение этого СУ дает два различных корня:

$$\lambda_1 = \frac{\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} + z_D}{\sigma_D^2 \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} - \sigma^2 \alpha_D};$$

$$\lambda_2 = \frac{\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} - z_D}{\sigma_D^2 \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} + \sigma^2 \alpha_D}.$$

Можно показать, что искомый максимум достигается при втором корне уравнения.

Подставив корень λ_2 в систему уравнений (9), для координаты x получим выражение $\Theta_1(\mathbf{a})$ (11):

$$\Theta_1(\mathbf{a}) = \frac{\alpha_x}{1 + \sigma^2 \lambda} = \frac{\alpha_x}{1 + \frac{\sigma^2 (\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} - \alpha_D)}{\sigma_D^2 \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} + \sigma^2 \alpha_D}}.$$

После упрощения выражение примет вид

$$\Theta_1(\mathbf{a}) = z_x \left(\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \sigma_D^2} \frac{\alpha_D}{\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2}} + \frac{\sigma_D^2}{\sigma^2 + \sigma_D^2} \right). \quad (12)$$

Аналитическое исследование оценки. В (12) получена нелинейная МП-оценка величины x_M . Изучим ее свойства.

Несмещенность оценки. Способ отыскания МО случайной величины, полученной преобразованием другой случайной величины, описан в [3]. В рассматриваемом случае МО можно найти следующим образом:

$$M\{\hat{\theta}_n\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_n(\mathbf{a}) p_{\mathbf{a}|\theta} d\mathbf{z}. \quad (13)$$

Разложим функцию $\Theta_n(\mathbf{a})$ (11) в ряд Тейлора [2] до второй производной включительно в окрестности истинного положения точки M в предположении несмещенности оценки:

$$\begin{aligned} \Theta_n(\mathbf{a}) &= \Theta_n(\mathbf{a})|_{\mathbf{a}=\theta} + \\ &+ \frac{1}{1!} \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \Theta_n(\mathbf{a})|_{\mathbf{a}=\theta}}{\partial \alpha_i} (\alpha_i - \theta_i) + \\ &+ \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \Theta_n(\mathbf{a})|_{\mathbf{a}=\theta}}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} (\alpha_i - \theta_i)(\alpha_j - \theta_j) + \\ &+ o_2(\mathbf{a}). \end{aligned} \quad (14)$$

Пренебрежем остаточным членом ряда $o_2(\mathbf{a})$ ввиду его малости. Подставим (14) в (13) и проанализируем полученное выражение почленно.

При $\mathbf{a} = \theta$ $\lambda(\theta) = 0$ и первый член оценки (14) с учетом (9) дает сам параметр:

$$\Theta_n(\mathbf{a} = \theta) = \theta_n.$$

Второй член подстановки (14) в (13) в той же точке дает:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \Theta_n(\mathbf{a})}{\partial \alpha_i} \Big|_{\mathbf{a}=\boldsymbol{\theta}} (\alpha_i - \theta_i) p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}} d\mathbf{z} = \frac{\partial \Theta_n(\mathbf{a})}{\partial \alpha_i} \Big|_{\mathbf{a}=\boldsymbol{\theta}} \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha_i - \theta_i) p_{\alpha_i|\theta_i} dz_i = 0. \quad (15)$$

Переход от тройного интеграла к одинарному осуществляется по условию нормировки функции $p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}}$, а получившийся интеграл равен нулю как первый центральный момент случайной величины α_i .

Член (13), содержащий вторые производные оценки, имеет вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2 \Theta_n(\mathbf{a})}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \Big|_{\mathbf{a}=\boldsymbol{\theta}} (\alpha_i - \theta_i)(\alpha_j - \theta_j) p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}} d\mathbf{a} = \frac{\partial^2 \Theta_n(\mathbf{a})}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \Big|_{\mathbf{a}=\boldsymbol{\theta}} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\alpha_i - \theta_i)(\alpha_j - \theta_j) p_{\alpha_i, \alpha_j|\theta_i, \theta_j} d\alpha_i d\alpha_j. \quad (16)$$

Переход к двойному интегралу выполнен с помощью операции нормировки, аналогичной (15). Для $i \neq j$ интеграл (16) равен нулю как корреляционный момент независимых величин. При $i = j$ (16) дает дисперсию величины z_i :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2 \Theta_n(\mathbf{a})}{\partial \alpha_i^2} \Big|_{\mathbf{a}=\boldsymbol{\theta}} (\alpha_i - \theta_i)^2 p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}} d\mathbf{a} = \frac{\partial^2 \Theta_n(\mathbf{a})}{\partial \alpha_i^2} \Big|_{\mathbf{a}=\boldsymbol{\theta}} \sigma_i^2.$$

В результате для компонент вектора измерений (1) получим:

$$M\{\hat{\theta}_n\} = \theta_n + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial^2 \Theta_n(\mathbf{a})}{\partial \alpha_i^2} \Big|_{\mathbf{a}=\boldsymbol{\theta}} \sigma_i^2 \right]. \quad (17)$$

где $M\{\cdot\}$ – символ математического ожидания.

Выражение для МО получим, подставив (12) в (17). Можно показать, что при достаточно существенно отличных от нуля элементах вектора $\boldsymbol{\theta}$ ($\theta_n \gg \sigma_n$) смещение МО оценки от их значений достаточно мало. Таким образом, оценку можно считать несмещенной. Для более сложной структуры $\Theta_n(\mathbf{a})$ аналогичный результат можно показать, например, с помощью численного моделирования.

Корреляционная матрица оценки. Получим аналитические выражения для характеристик оценки, исходя из допущения о ее несмещенности. Область применения полученных выражений определим впоследствии с помощью численного моделирования. Для несмещенных многомерных МП-оценок корреляционная матрица может быть найдена как матрица, обратная информационной матрице Фишера Φ [4]:

$$K_{МП} = \Phi^{-1}. \quad (18)$$

Элементы матрицы Фишера, в свою очередь, могут быть найдены как вторые производные логарифмической ФП по соответствующим элементам вектора состояния, взятые с обратным знаком и усредненные по реализациям вектора наблюдений:

$$\Phi_{ij} = - \frac{\partial^2 \ln p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}}}{\partial \theta_i \partial \theta_j}.$$

Корреляционная матрица для скорректированных по (9) координат имеет вид:

$$K_{МП} = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{x}}^2 & r_{xy} \sigma_{\hat{x}} \sigma_{\hat{y}} \\ r_{xy} \sigma_{\hat{x}} \sigma_{\hat{y}} & \sigma_{\hat{y}}^2 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где $\sigma_{\hat{x}}$, $\sigma_{\hat{y}}$ – СКО оценок координат \hat{x}_M , \hat{y}_M соответственно; r_{xy} – коэффициент корреляции оценок координат. Найдем все элементы информационной матрицы Фишера, дифференцируя логарифмическую ФП с учетом связи между элементами вектора наблюдения \mathbf{a} согласно (2). В этом случае для переменной x_M имеем:

$$\frac{dD}{dx_M} = \frac{d\sqrt{x_M^2 + y_M^2}}{dx_M} = \frac{2x_M}{2\sqrt{x_M^2 + y_M^2}} = \frac{x_M}{D}.$$

Для переменной y_M аналогично:

$$\frac{dD}{dy_M} = \frac{y_M}{D}.$$

Элементы матрицы Фишера имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{11} = - \frac{\partial^2 \ln p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}}}{\partial x_M^2} = \frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_D^2} \frac{x_M^2}{D^2}; \\ \Phi_{22} = - \frac{\partial^2 \ln p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}}}{\partial y_M^2} = \frac{1}{\sigma_y^2} + \frac{1}{\sigma_D^2} \frac{y_M^2}{D^2}; \\ \Phi_{12} = \Phi_{21} = - \frac{\partial^2 \ln p_{\mathbf{a}|\boldsymbol{\theta}}}{\partial x_M \partial y_M} = \frac{1}{\sigma_y^2} + \frac{1}{\sigma_D^2} \frac{|x_M y_M|}{D^2}. \end{array} \right. \quad (20)$$

Математическое моделирование алгоритма оценки. Для оценки работоспособности разработанный алгоритм промоделирован в среде MATLAB [5]. Моделирование включало несколько этапов.

Этап 1. Генерирование входных данных. В качестве исходных данных были сгенерированы последовательности измерений α_{xn} , α_{yn} , α_{Dn} :

$$\begin{aligned} z_{xn} &= x_M + \sigma_x \xi_n; \\ z_{yn} &= y_M + \sigma_y \eta_n; \\ z_{Dn} &= \sqrt{x_M^2 + y_M^2} + \sigma_D \zeta_n, \end{aligned}$$

где $k = \overline{1, k_{\max}}$; ξ_n , η_n , ζ_n – последовательности центрированных нормальных случайных величин с единичной дисперсией.

Этап 2. Расчет МП-оценки. Расчет оценки включает в себя численное решение уравнений системы (9) для набора данных, полученных на предыдущем этапе. В результате на выходе этапа имеем векторы оценок $\{\hat{x}_k\}$, $\{\hat{y}_k\}$.

Работа алгоритма на плоскости при выборке из 15 оценок проиллюстрирована рис. 2. На рисунке треугольным маркером показано истинное положение цели (координаты x_M , y_M); штриховыми линиями нанесены результаты измерений дальности, ромбовидными маркерами даны оценки положения цели по результатам расчета \hat{x}_n , \hat{y}_n ; круглыми – оценки, полученные комплексированием этих оценок с оценками дальности \hat{D} . Отраженные на рис. 2 результаты моделирования показывают, что комплексирование данных о местоположении с данными о дальности уменьшает разброс оценок координат и делает эти оценки зависимыми.

Этап 3. Расчет точности оценок. На этом этапе определяется корреляционная матрица (19). Матрица определялась двумя способами: с ис-

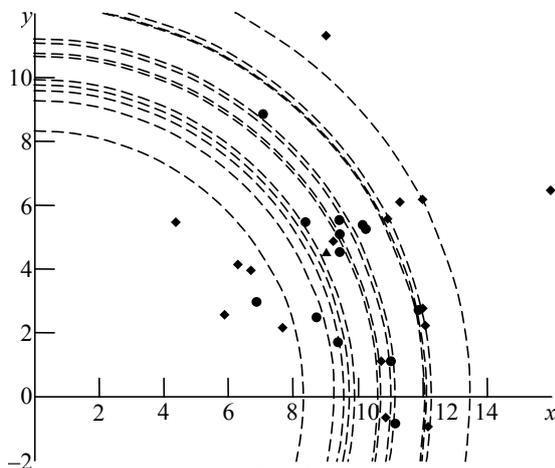
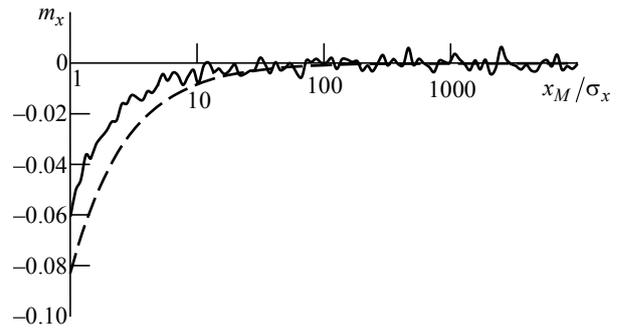
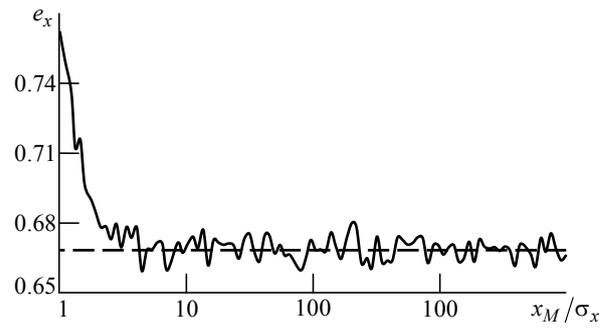


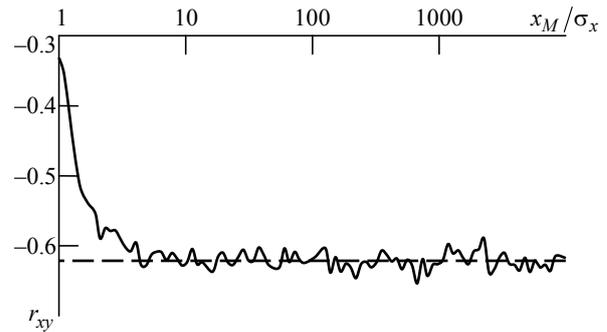
Рис. 2



a



b



в

Рис. 3

пользованием функция MATLAB $\text{cov}(x, y)$ [4] по результатам численного моделирования $\{\hat{x}_n\}$, $\{\hat{y}_n\}$ и обращением информационной матрицы Фишера, полученной согласно (18), (20).

Результаты моделирования для $\sigma_x = \sigma_y = 3$, $\sigma_D = 2$ представлены на рис. 3. Истинное положение цели M лежит в пределах $x_M = (2 \dots 2 \cdot 10^4) \sigma_x$, $y_M = (1 \dots 1 \cdot 10^4) \sigma_y$, количество отсчетов измерений $k_{\max} = 10^4$.

На рис. 3 представлены зависимости характеристик оценки от нормированного значения координаты x_M/σ_x : a – нормированного смещения оценки $m_x = (\hat{x} - x_M)/\sigma_x$; b – нормированного СКО $e_x = \sqrt{(\hat{x} - x_M)^2}/\sigma_x$; $в$ – коэффициента корреляции r_{xy} .

Как следует из рис. 3, результаты численного моделирования сходятся с результатами аналитических расчетов при отношении $\theta_n/\sigma_n > 10 \dots 20$. Расхождение результатов при меньших значениях θ_n/σ_n объясняется смещением МО оценки, рассчитываемым по (12), (17), в этой области.

Обнаруженное в процессе исследования смещение оценки не влияет на практическую применимость последней по двум причинам. Во-первых, область $\theta_n < 20\sigma_n$, в которой наблюдается смещение, не представляет практического интереса, поскольку на практике объекты-носители системы ОН не сближаются на столь малые расстояния. В теоретическое рассмотрение эта область включена для демонстрации расходимости оценки. Во-вторых, из-за крайне малых значений смещение (рис. 3) не будет заметно на фоне случайных ошибок оценки.

Оценка для трехмерного случая. Для распространения полученных результатов на измерения в пространстве необходимо добавить в систему (9) уравнение относительно пространственной координаты z :

$$\hat{z}_M = \frac{\alpha_z}{1 + \sigma_z^2 \lambda},$$

а граничное условие (6) примет вид

$$\varphi(\theta) = \hat{z}_x^2 + \hat{z}_y^2 + \hat{z}_z^2 - \hat{D}^2 = 0.$$

Если ошибки измерений горизонтальных координат можно принять равными, то для измерений по высоте такое допущение неприемлемо как для данных как СРНС [6], так и БИНС [7]. При этом степень СУ после подстановки (7) и (12) в (13) становится равной 6, что налагает определенные ограничения на расчет параметра λ . На практике решение уравнения проводится численным способом, что на современном этапе развития алгоритмов решения СУ не составляет труда. При $\sigma_x = \sigma_y$ уравнение имеет четвертую степень (максимальная для СУ, при которой существует общее решение), и параметр λ может быть вычислен с применением резольвенты по способу, представленному в [3].

Корреляционная матрица оценки (19) примет вид

$$K_{МП} = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{x}}^2 & r_{xy}\sigma_{\hat{x}}\sigma_{\hat{y}} & r_{xz}\sigma_{\hat{x}}\sigma_{\hat{z}} \\ r_{xy}\sigma_{\hat{x}}\sigma_{\hat{y}} & \sigma_{\hat{y}}^2 & r_{yz}\sigma_{\hat{y}}\sigma_{\hat{z}} \\ r_{xz}\sigma_{\hat{x}}\sigma_{\hat{z}} & r_{yz}\sigma_{\hat{y}}\sigma_{\hat{z}} & \sigma_{\hat{z}}^2 \end{bmatrix}.$$

Информационная матрица Фишера должна быть дополнена следующими элементами:

$$\Phi_{13} = \Phi_{31} = -\frac{\partial^2 \ln p_{\alpha|\theta}}{\partial x_M \partial z_M} = \frac{1}{\sigma_D^2} \frac{|x_M z_M|}{D^2};$$

$$\Phi_{23} = \Phi_{32} = -\frac{\partial^2 \ln p_{\alpha|\theta}}{\partial y_M \partial z_M} = \frac{1}{\sigma_D^2} \frac{|y_M z_M|}{D^2};$$

$$\Phi_{33} = -\frac{\partial^2 \ln p_{\alpha|\theta}}{\partial z_M^2} = \frac{1}{\sigma_z^2} + \frac{1}{\sigma_D^2} \frac{z_M^2}{D^2}.$$

Реализация алгоритма оценки. Схема фильтра, корректирующего относительные координаты, полученные с помощью двух независимых СНС, установленных на борту носителей системы ОН, с помощью измерений дальности, изображена на рис. 4. Информация от СНС оппонента передается в фильтр через канал информационного обмена (ИО).

Дополнительно в фильтре можно проводить расчет числовых оценок (18), (20). Оценку на выходе фильтра можно считать несмещенной в области больших значений отношения θ_n/σ_n . Также предложен способ расчета смещения оценки в области малых значений θ_n/σ_n для простейшего двумерного случая по (12), (17). Для общего случая вывод аналитического выражения для МО оценки затруднен, так как требует функции $\Theta_n(\alpha)$ в общем виде, для получения которой необходимо общее решение СУ высокой степени.

При необходимости работы в области смещенной оценки ее дисперсию можно вычислить [3] как

$$\sigma_n^2 = [1 + b'(\theta_n)]^2 \Phi_{nn}^{-1}, \quad (21)$$

где верхний штрих обозначает производную по аргументу. Смещение $b(\theta_n)$ определяется из выражения:

$M\{\hat{\theta}_n\} = \theta_n + b(\theta_n)$ и может быть найдено из (17):

$$b(\theta_n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial^2 \Theta_n(\alpha)}{\partial z_i^2} \Big|_{\alpha=\theta} \sigma_i^2 \right].$$

При малом значении θ_n/σ_n в качестве элемента вектора θ_n можно взять оценку $\hat{\theta}_n$ и уточ-

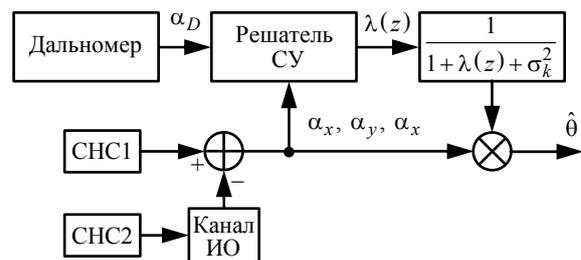


Рис. 4

нить ее дисперсию по выражению (21), при численном расчете производной $b'(\theta_n)$ любым удобным способом.

В заключение отметим, что практическое применение разработанной оценки в виде системы уравнений (7) затруднено. Это обусловлено как типичными недостатками оптимальных оценок, так и спецификой их применения в системах ОН. К первым относятся необходимость точного знания характеристик шумов измерений (распределение и дисперсия) и соответствие реальных параметров принятым. Специфика проявляется во взаимной корреляции погрешностей измерения

координат в пространстве, возможных пропаданиях измерений и выбросах.

Ценность полученной оценки заключается в ее эффективности (достижении границы Крамера–Рао как МП-оценкой [3]). Синтезированная оценка может быть заложена в основу более сложных алгоритмов, учитывающих различные дестабилизирующие факторы, свойственные системам ОН, и устойчивых к ним. Для практического применения этой МП-оценки необходимы различные модификации алгоритма оценивания, разработка которых выходит за рамки настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов В. К., Герчиков А. Г., Чернявский А. Г. Локальные радиотехнические системы межсамолетной навигации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 122 с.
2. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. "Радиотехника" / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 544 с.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
5. Covariance – Matlab.cov. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/cov.html> (дата обращения 24.12.2016).
6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
7. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"». СПб., 2009. 280 с.

V. K. Orlov, V. S. Ramadanov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Correction of the Relative Coordinates by Range using the Maximum Likelihood Method

The maximum likelihood estimating algorithm for complexion measurement of the relative coordinates and distance was created, the most efficient use of heterogeneous data sources is allowed. The accuracy of the algorithm is investigated in two ways: analytically and by numerical simulation. The applicability of the analyses is given, the coordinate filter, implemented the developed assessment, is constructed.

Maximum Likelihood Estimation, Fisher Information Matrix, Navigation Data Complexing, Relative Coordinate Correction

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.



УДК 621.396.96

Д. А. Винник

Южно-Уральский государственный университет

И. А. Устинова, А. Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование замещенных алюминием монокристаллов гексаферрита бария–свинца ($Ba_{1-x}Pb_xFe_{12-y}Al_yO_{19}$), полученных методом спонтанной кристаллизации¹

Впервые исследованы сверхвысокочастотные свойства монокристаллов гексаферрита бария–свинца, замещенного алюминием, состава $Ba_{1-x}Pb_xFe_{12-y}Al_yO_{19}$ при $x \leq 0.2$ и $y \leq 2.7$, полученных методом спонтанной кристаллизации из раствора на основе оксида свинца. Показано, что частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) в образцах в магнитных полях до 4.5 кЭ лежат в диапазоне 80...100 ГГц. Ширина кривой ФМР варьируется от 150 до 550 Э в зависимости от степени замещения алюминием.

Гексагональные ферриты, ферромагнитный резонанс

Интерес к получению гексагональных ферритов в мире значительно возрос в последнее десятилетие благодаря перспективе их применения для устройств электроники миллиметрового диапазона [1]. Бариевые ферриты являются перспективными наполнителями радиопоглощающих покрытий [1]. К их достоинствам следует отнести невысокую стоимость, высокую химическую стабильность, а также высокие значения поля магнитной кристаллографической анизотропии. Кроме того, частичным замещением магнитных ионов железа на немагнитные ионы, например алюминия, удастся в значительной степени модифицировать структуры и изменять комплекс физических свойств данного материала [1]–[6].

Для оптимизации свойств матрицы гексагональных ферритов под требования электроники миллиметрового диапазона (повышения поля анизотропии и частоты ферромагнитного резонанса (ФМР)) частично замещают ионы железа диамагнитными ионами [7]–[8]. Так, в [9], [10] опубликованы результаты исследования замещенных алюминием монокристаллических пленок гексаферрита бария в миллиметровом и субтерагерцовом диапазонах.

Результаты выращивания объемных монокристаллов $BaFe_{12-y}Al_yO_{19}$ из раствора на основе Na_2O

и исследования их сверхвысокочастотных характеристик опубликованы в [11]. Целью работы, представленной в настоящей статье, являлось исследование замещенных алюминием монокристаллов гексаферрита бария–свинца ($Ba_{1-x}Pb_xFe_{12-y}Al_yO_{19}$).

Рассмотрим методику получения монокристаллов гексаферрита бария–свинца [11]. Монокристаллы выращивались из раствора на основе оксида свинца. Для снижения испарения растворителя и повышения контролируемости процесса кристаллообразования в раствор добавляли борный ангидрид. Из раствора, содержащего массовые доли Al_2O_3 – 4.350 %, Fe_2O_3 – 17.466 %, $BaCO_3$ – 5.396 %, B_2O_3 – 15.991 % и PbO – 56.797 %, были получены кристаллы $Ba_{1-x}Pb_xFe_{12-y}Al_yO_{19}$ при $x \leq 0.2$, $y \leq 2.8$ размером до 5 мм.

Химический состав монокристаллов определяли на растровом электронном микроскопе Jeol JSM7001F с энергодисперсионным анализатором Oxford INCA X-max 80. Для исследования структуры использовали дифрактометр Rigaku Ultima IV. Дифрактограммы получены в интервале углов 10...80° со скоростью 1°/мин. Для исследова-

¹ Работа поддержана: в СПбГЭТУ Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-32-50106 мол_нр); в ЮУрГУ Правительством РФ (постановление № 211 от 16.03.2013, соглашение № 02.А03.21.0011).

Таблица 1

Брутто-формула кристалла	$a, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [12]	5.893	23.194	697.5
$\text{Ba}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Fe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$	5.8176(5)	22.8992(13)	671.17(8)

дований отобранные наиболее ограненные монокристаллы перетирались в агатовой ступе. Порошок размещали в держателе из монокристаллического кремния. Установлено, что все образцы были монофазными гексаферритами со структурой магнетоплюмбита [1].

В табл. 1 приведены значения параметров кристаллической решетки изготовленных образцов состава $\text{Ba}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Fe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$ (a, c – параметры ячейки; V – ее объем; в скобках указан номер резонанса). Из таблицы следует, что параметры кристаллической решетки экспериментальных образцов заметно ниже, чем приведенные в [12] значения для чистой матрицы $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Это можно объяснить меньшим размером ионов алюминия и свинца по сравнению с ионами железа и бария [13].

После подтверждения монофазности полученных материалов были отобраны восемь единичных наиболее ограненных монокристаллов. Из них откалыванием изготовлены пластины толщиной от 100 до 200 мкм. Площадь больших плоскостей составляла около 2 мм^2 . Ось легкого намагничивания была ориентирована перпендикулярно плоскости образца.

Экспериментальное исследование сверхвысокочастотных и магнитных свойств серии гексаферритов состава $\text{Ba}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Al}_y\text{O}_{19}$ проведено путем измерения резонансных кривых при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля смещения H_{ext} в диапазоне $0 \dots 4.5 \text{ кЭ}$. Измерялись спектры отражения

$$S_{11}(f) = 20 \log [P_{\text{ref}}(f) / P_{\text{in}}(f)],$$

где f – частота возбуждения; P_{ref} , P_{in} – отраженная и падающая мощности соответственно. По результатам измерений построены частотно-полевые зависимости и определены магнитные свойства материалов.

Резонансные кривые исследовались в частотном диапазоне $75 \dots 110 \text{ ГГц}$. Измерения проведены с помощью векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA 40 с преобразователем частоты Rohde&Schwarz ZVA-Z110. Для измерений использовался волновод WR-10. Каждый магнитный образец был приклеен на латунную пластину

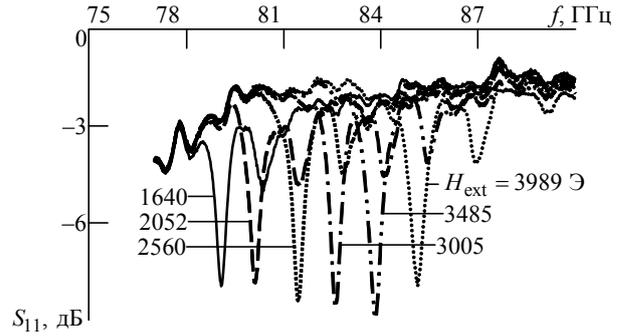


Рис. 1

толщиной 3 мм с ровными поверхностями. Пластина с образцом прикреплялась к фланцу с открытого конца волновода образцом вовнутрь. Латунная пластина замыкала накоротко фланец с образцом, являвшийся измерительной ячейкой. Резонаторы намагничивались однородным магнитным полем, направленным перпендикулярно к их плоскости, т. е. параллельно легкой оси гексаферрита.

Рассмотрим полученные результаты. Типичные кривые поглощения гексаферритового резонатора состава $\text{Ba}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Fe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$, измеренные при воздействии внешнего магнитного поля со значениями напряженности, превышающими напряженность насыщения (рис. 1), демонстрируют два ярко выраженных резонансных пика, соответствующих низшим ферромагнитным модам. Повышение частоты этих пиков с ростом напряженности по линейному закону с угловым коэффициентом около 2.8 МГц/Э свидетельствует об их ферромагнитной природе. Аналогичные частотные отклики наблюдались для других магнитных образцов. Диэлектрические моды резонаторов не наблюдались, так как при толщине образцов менее 200 мкм частота диэлектрической моды превышает 150 ГГц .

На рис. 2 показана зависимость частоты ФМР f_0 от напряженности внешнего магнитного поля H_{ext} . Маркерами представлены экспериментальные данные, линиями – результат их линейной аппроксимации. Цифрами указан номер резонанса.

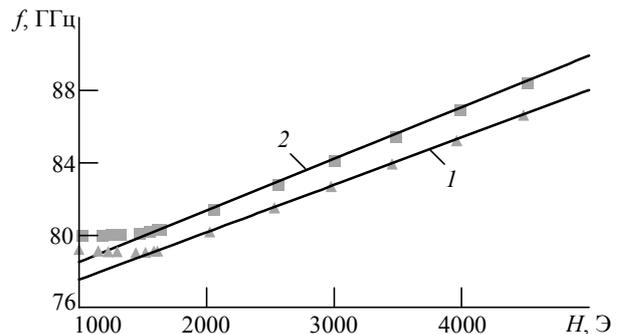


Рис. 2

Таблица 2

Брутто-формула кристалла	f_0 , ГГц	$H_{\text{ext. s}}$, кЭ	$2\Delta H$, Э	γ_{exp} , МГц/Э	f_{0s} , ГГц	H_a , кЭ
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$ (1)	97.5...101.48	1.738	552	1.419	97.5	68.71
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$ (2)	94.28...98.5	1.738	390	1.499	94.28	62.9
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$ (1)	95.8...100.4	1.653	244	1.623	95.8	59.03
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$ (2)	97.6...101.4	1.653	215	1.36	97.6	71.76
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{9.9}\text{Al}_{2.1}\text{O}_{19}$ (1)	83.54...90.18	1.432	451	2.263	83.54	36.92
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{9.9}\text{Al}_{2.1}\text{O}_{19}$ (1)	80.0...88.436	1.545	174	2.84	80.226	28.2
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{9.9}\text{Al}_{2.1}\text{O}_{19}$ (2)	78.976...86.536	1.545	156	2.618	78.976	30.167
$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{Fe}_{10.1}\text{Al}_{1.9}\text{O}_{19}$ (1)	90.18...97.52	1.265	283	2.49	90.18	36.22

Зависимость $f_0(H_{\text{ext}})$ линейна для полей смещения с напряженностью, превышающей порог насыщения, что соответствует теории ФМР. Для полей смещения с меньшей напряженностью имеет место гистерезис резонансной частоты: частоты ФМР, измеренные при возрастании H_{ext} и при ее убывании, различны, что аналогично исследованию [14]. Зависимости на рис. 2 получены при возрастающем поле.

Результаты аналогичных измерений для гексаферритовых образцов других составов представлены в табл. 2. В скобках указан номер резонанса. Представленные данные показывают, что при нулевой напряженности поля частота ФМР f_0 находится в диапазоне 79...97.5 ГГц и зависит в основном от уровня замещения алюминия y в $\text{Ba}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Fe}_{12-y}\text{Al}_y\text{O}_{19}$. Благодаря магнитным диполям в гексаферритовой пленке внутреннее магнитное поле, выравненное полем анизотропии, не увеличивается, пока его напряженность не превысит порог насыщения

$$H_{\text{ext. s}} = 4\pi M_s, \quad (1)$$

где $4\pi M_s$ – намагниченность насыщения.

Поэтому с ростом намагничивания пленочных резонаторов от нулевого значения частота ФМР приблизительно постоянна при H_{ext} ниже этого порога.

Из частотно-полевых зависимостей (см. рис. 2) определены гиромагнитное соотношение γ_{exp} , намагниченность насыщения $H_{\text{ext. s}}$, напряженность поля одноосной магнитной кристаллографической анизотропии H_a и полная ширина кри-

вой ФМР $2\Delta H$. Ширина кривой ФМР определялась как ширина кривой резонансного поглощения на половинном уровне поглощения.

В соответствии с теорией для гексагональных ферритов [15] частота ФМР определяется как

$$f_0 = \gamma(H_{\text{ext}} + H_a - 4\pi M_s), \quad (2)$$

где $\gamma = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное соотношение. Экспериментальные значения гиромагнитного отношения насыщения γ_{exp} определялись как наклон кривой $f_0(H_{\text{ext}})$.

Напряженность поля анизотропии определена по значению частоты f_{0s} , при которой происходит переход в насыщение. Как следует из (2) с учетом (1):

$$H_a = f_{0s} / \gamma_{\text{exp}}.$$

Полная ширина кривой ФМР $2\Delta H$ определена из ширины резонансной кривой, измеренной на половине уровня мощности поглощения с учетом коэффициента связи резонатора с волноводом.

Таким образом, частоты ФМР в образцах лежат в диапазоне 80...100 ГГц. Напряженность поля магнитной кристаллографической анизотропии меняется в пределах 28...72 кЭ. Образцы с высоким полем анизотропии имеют малое значение гиромагнитного отношения. По результатам исследований следует сделать вывод, что у образцов, демонстрировавших гиромагнитное отношение, близкое к стандартному значению 2.8 МГц/Э, наблюдавшиеся резонансы имеют ферромагнитную природу. Природа резонансов образцов с низким значением гиромагнитного отношения 1.3...1.7 МГц/Э требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Harris V. G. Modern Microwave Ferrites // IEEE Trans. on Magn. 2012. Vol. M-48, iss. 3. P. 1075–1104.
- Computational and Experimental Study on the Cation Distribution of La-Cu Substituted Barium Hexafer-

- rites / C. Wu, Z. Yu, Y. Yang, K. Sun, J. Nie, Y. Liu, X. Jiang, Z. Lan // J. Alloys Compd. 2016. Vol. 664. P. 406–410.

- Synthesis, Characterization and Magneto-optical properties of $\text{BaBi}_x\text{La}_x\text{Y}_x\text{Fe}_{12-3x}\text{O}_{19}$ ($0.0 \leq x \leq 0.33$) Hex-

aferrites / S. Güner, I. A. Auwal, A. Baykal, H. Sözeri // J. Magn. Magn. Mat. 2016. Vol. 416. P. 261–268.

4. Investigation of the Microwave Absorptive Behavior of Doped Barium Ferrites / A. Ghasemi, A. Hossienpour, A. Morisako, X. Liu, A. Ashrafizadeh // Mater. Des. 2008. Vol. 29. P. 112–117.

5. Afghahi S. S. S., Jafarian M., Atassi Y. Microstructural and Magnetic Studies on $BaMg_xZn_xX_{2x}Fe_{12-4x}O_{19}$ ($x = Zr, Ce, Sn$) Prepared via Mechanical Activation Method to Act as a Microwave Absorber in X-band // J. Magn. Magn. Mat. 2016. Vol. 406. P. 184–191.

6. Effect of Mg^{2+} and Ti^{4+} Dopants on the Structural, Magnetic and High Frequency Ferromagnetic Properties of Barium Hexaferrite / M. H. Shams, A. S. H. Rozatian, M. H. Yousefi, J. Valíček, V. Šepelák // J. Magn. Magn. Mater. 2016. Vol. 399. P. 10–18.

7. Исследование кристаллической и магнитной структуры бариевых ферритов, допированных диамагнитными ионами / А. В. Труханов, В. А. Турченко, И. А. Бобриков, С. В. Труханов, А. М. Балагуров // Кристаллография. 2015. Т. 60. С. 693–700.

8. Evolution of Structure and Physical Properties in Al-Substituted Ba-Hexaferrites / A. Trukhanov, L. Panina, S. Trukhanov, V. Turchenko, M. Salem // Chin. Phys. B. 2016. Vol. 25. P. 016102.

D. A. Vinnik

South Ural State University

I. A. Ustinova, A. B. Ustinov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Investigation of Aluminum Substituted Single-Crystal Barium Lead Hexaferrites

$Ba_{1-x}Pb_xFe_{12-y}Al_yO_{19}$ Grown by Flux Technique

Microwave properties of aluminum substituted single-crystal barium lead hexaferrites $Ba_{1-x}Pb_xFe_{12-y}Al_yO_{19}$ ($x \leq 0.2$ and $y \leq 2.7$) grown by flux technique have been investigated for the first time. It is shown that ferromagnetic resonance frequencies are in the range 80...100 GHz at magnetic fields of 4.5 kOe. The width of ferromagnetic resonance curve varies from 150 Oe to 550 Oe and depends on the degree of aluminum substitution.

Hexagonal ferrites, ferromagnetic resonance

Статья поступила в редакцию 7 октября 2016 г.

9. Al Substituted Ba-Hexaferrite Single-Crystal Films for Millimeter-Wave Devices / A. B. Ustinov, A. S. Tatarenko, G. Srinivasan, A. M. Balbashov // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 105–108.

10. Ustinov A. B., Srinivasan G. Subterahertz Excitations and Magnetoelectric Effects in Hexaferrite-Piezoelectric Bilayers // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 93–95.

11. Structural and Millimeter-Wave Characterization of flux Grown Al Substituted Barium Hexaferrite Single Crystals / D. A. Vinnik, A. B. Ustinov, D. A. Zhrebtsov, V. V. Vitko, S. A. Gudkova, I. Zakharchuk, E. Lähderanta, R. Niewa // Ceram. Int. 2015. Vol. 41. P. 12728–12733.

12. Townes W. D., Fang J. H., Perrotta A. J. The Crystal Structure and Refinement of Ferromagnetic Barium Ferrite, $BaFe_{12}O_{19}$ // Z. Kristallogr. 1967. Vol. 125. P. 437–449.

13. Shannon R. D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides // Acta Crystallogr. 1976. Vol. A32. P. 751–767.

14. Wang S. G., Yoon S. D., Vittoria C. Microwave and Magnetic Properties of Double-Sided Hexaferrite Films on (111) Magnesium Oxide Substrates // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. P. 6728–6732.

15. Kittel C. On the Theory of Ferromagnetic Resonance Absorption // Phys. Rev. 1948. Vol. 73, iss. 2. P. 155–161.



УДК 621.317:372.22

С. Ю. Молчанов

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.

Н. М. Ушаков

*Саратовский филиал Института радиотехники и электроники**им. В. А. Котельникова Российской академии наук*

А. П. Креницкий, В. П. Мещанов

*АО «Центральный научно-исследовательский институт
измерительной аппаратуры» (Саратов)*

Фильтр для миллиметрового диапазона длин волн с узкой полосой пропускания¹

Представлена математическая модель и описан макетный образец полосового фильтра с центральной частотой 140 ГГц. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных в диапазоне 75...260 ГГц. Описаны преимущества и недостатки представленного полосового фильтра по сравнению с известными.

Диапазон КВЧ, полосовой фильтр, нанокompозит, диэлектрическая проницаемость, периодическая структура

Современный этап развития радиотехники подразумевает переход на более короткие длины волн. Освоение верхней части миллиметрового диапазона является важным направлением развития радиотехнических устройств. Для успешного освоения миллиметрового диапазона требуется создание активных и пассивных элементов, в частности полосовых фильтров. Технологически важной задачей является разработка таких фильтров с малыми собственными потерями в заданной полосе пропускания и требуемой крутизной спада [1].

Активное развитие техники миллиметрового диапазона сдерживается, в т. ч. из-за отсутствия компонентной базы. Создание таких компонентов с использованием традиционных методологических и технологических подходов наталкивается на ряд проблем, связанных с малыми геометрическими размерами волноведущих систем, необходимостью установления жестких допусков при изготовлении компонентов, требованием высокого качества обработки рабочих поверхностей и др.

В настоящее время известные пассивные фильтры миллиметрового диапазона [2] имеют минимальное собственное ослабление на цен-

тральной частоте 1...3 дБ и полосу пропускания по уровню половины мощности (-3 дБ) не более 15–20 % относительно центральной частоты фильтра, что не удовлетворяет современным требованиям к крутизне спадов частотной характеристики фильтра. Для повышения крутизны спада в зоне непропускания нужно использовать каскад не менее, чем из двух фильтров [3], [4].

Для анализа физических процессов в подобных устройствах применяют сложные математические модели, реализация которых возможна только с привлечением вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения. Бурное развитие теории численных методов при решении уравнений математической физики привело к появлению значительного числа академических и лицензионных пакетов программ, позволяющих создавать и анализировать модели микроволновых устройств различного назначения. Наиболее популярными являются пакеты программ Comsol [5], ANSYS [6] и специализированные пакеты QuickWave-3D [7], HFSS [8], CSTMWS [9] и мн. др.

¹ Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 5907ГУ/2015 от 11.06.2015 г.).

Основой практически всех программ моделирования микроволновых устройств является метод конечных элементов (МКЭ). В [10] с помощью компьютерного моделирования удалось подобрать диэлектрическую вставку в виде полимерного нанокompозитного образца, которая позволяет улучшить крутизну характеристики каскада полосовых фильтров, не приводя к значительному увеличению собственного ослабления.

Целью настоящей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование проблемы создания полосовых фильтров в коротковолновой части миллиметрового диапазона с использованием композитных наноматериалов.

Расчет и моделирование полосового фильтра. Для моделирования структуры с периодически повторяющимися фрагментами использованы каналы Флоке [11]. Под каналом Флоке понимается часть пространства, ограниченная вертикальными стенками, на которых установлены периодические граничные условия. Рассмотренная модель (рис. 1) сформирована из двух металлических прослоек 1, 2 с апертурными элементами в виде крестов 4 и диэлектрической прослойки 3 изменяемой толщины. Эффективная диэлектрическая проницаемость материалов рассчитывалась по моделям Коула–Коула, Дэвидсона–Коула для матрицы нанокompозита и по модели Максвелла–Гарнета для полимерного композита с нановключениями [12]. Численное моделирование необходимо для определения эффективной диэлектрической проницаемости с целью выбора оптимального нанокompозита. Синтезированный по указанным моделям [12] полимерный нанокompозитный образец имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon \approx 2$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta \approx 0.02$. Он заключен между проводящими металлическими поверхностями с апертурными элементами в виде крестов (рис. 2).

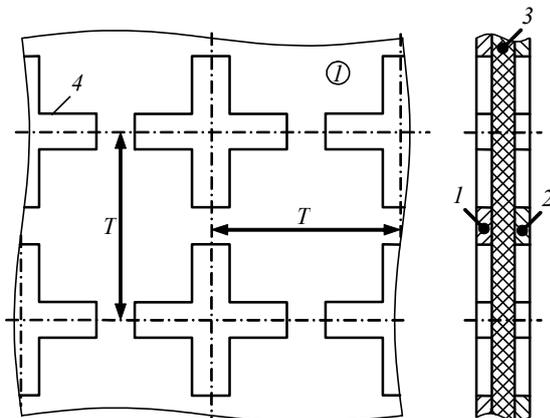


Рис. 1

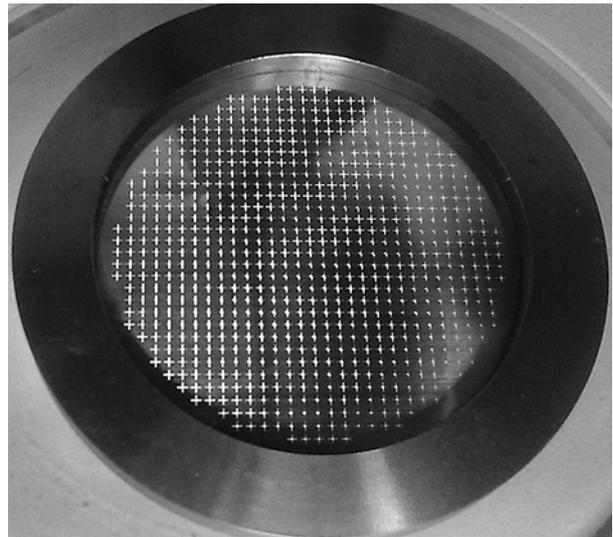


Рис. 2

Экспериментальное исследование. Для измерения коэффициента передачи полосового фильтра использовалось оборудование фирмы "Rohde&Schwarz": векторный анализатор цепей ZVA-40 и 3 пары преобразователей частоты (ZVA Z-110, ZVA Z-170 и RPG-260), работающих в диапазонах 75...110, 110...170 и 170...260 ГГц соответственно. Указанное оборудование позволяет измерять S-матрицу рассеяния в довольно большой частотной полосе, составляющей 185 ГГц.

Пошаговая калибровка оборудования проходила после полного прогрева в течение примерно 30 мин (согласно технической документации) с использованием известных калибровочных мер фирмы "Rohde&Schwarz" (Kalibration kit WR10, WR6, WR4 для ZVA Z-110, ZVA Z-170 соответственно и RPG-260).

На рис. 3 представлена установка для измерения коэффициента передачи полосового фильтра в открытом пространстве по коэффициенту прохождения электромагнитной волны S_{21} S-матрицы рассеяния. Методика измерений, проводимых после калибровки, сводилась к следующему: между рупорных антенн 2 и 3, прикрепленных к волноводным секциям преобразователей частот 4 и 5, расположенных напротив друг друга, помещался полосовой фильтр 1. Зависимость ослабления прошедшей через фильтр волны от частоты наблюдалась на экране векторного анализатора 6. Погрешность измерений векторного анализатора и преобразователей частоты фирмы "Rohde&Schwarz" составляла не более 0.2 дБ.

Измеренный коэффициент пропускания полосового фильтра на основе периодической многослойной структуры и полимерного нанокompозита

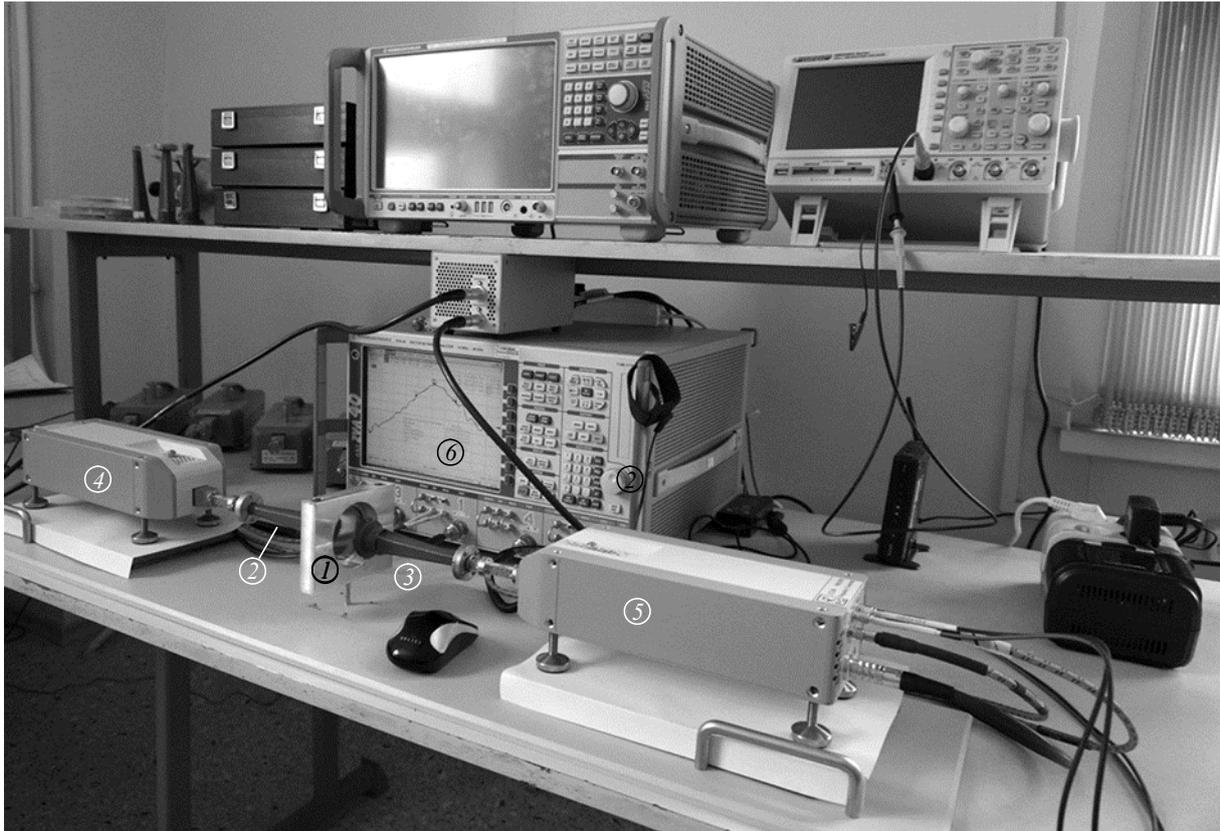
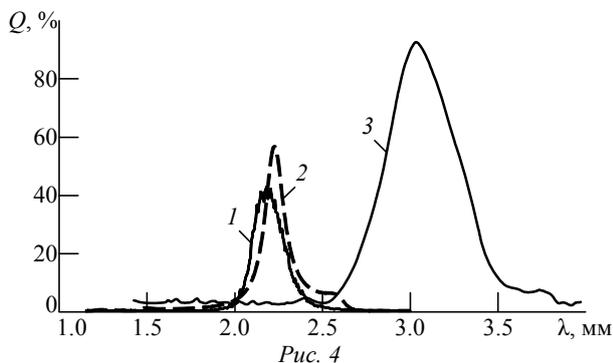


Рис. 3



зитного материала приведен на рис. 4 (кривая 1). Пропускание полосового фильтра на длине волны 2160 мкм (центральная частота $f_{ц} = 138.8$ ГГц) составляет 44 % (вносимые потери около 3.8 дБ). Полоса пропускания по уровню -3 дБ менее 12 ГГц, т. е. меньше 9 % центральной частоты фильтра.

Для сравнения на рис. 4 приведена частотная характеристика полосового фильтра компании "TYDEX" [13] (кривая 3). Вносимые потери этого фильтра значительно меньше по сравнению с измеренным фильтром: максимальный коэффициент пропускания более 90 % против 44 % у экспериментального образца. Однако ширина полосы пропускания (около 20 % от центральной частоты) более чем в два раза проигрывает этому образцу.

Из приведенных теоретических и экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что фильтр на основе периодических структур и нанокompозитных материалов имеет главное конкурентное преимущество – более узкую полосу по сравнению с фильтром компании "TYDEX". Различие характеристик теоретической модели фильтра и экспериментального образца (см. рис. 2, кривые 2 и 1 соответственно) можно объяснить недостаточной юстировкой при сборке образца и неточным вычислением комплексной диэлектрической проницаемости при моделировании.

В заключение следует отметить, что преимуществами измеренного фильтра является узкая полоса пропускания по уровню -3 дБ: 12 ГГц против 13.4 ГГц у аналогичного фильтра, но с воздушной прослойкой, а не с нанокompозитным веществом [4], [14], и меньшие габариты за счет меньшей толщины прослойки [15]. Для уменьшения собственных потерь фильтра и увеличения крутизны спада требуется в дальнейшем создание нового композитного материала с меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь в области пропускания фильтра и с большим его значением на других частотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологические особенности изготовления полотно-пропускающих фильтров, работающих в СВЧ-, КВЧ-диапазонах / Л. И. Оборина, А. Е. Романов, Б. К. Исмаилов, И. В. Стерехов, И. В. Трифанов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2010. Вып. 2(28). С. 125–130.
2. Kropotov G. I., Tsygankova E. V. TYDEX: optics for THz photonics // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Сер. Физика. 2010. Т. 5, № 4. С. 113–116.
3. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley, 2000. 153 p.
4. Исследование и разработка полосовых фильтров диапазона 0.1...0.2 ТГц / С. А. Алавердян, С. Ю. Молчанов, А. И. Довгань, А. П. Креницкий, В. П. Мещанов // Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами: материалы Всерос. науч. шк.-семинара. Саратов, 14–15 мая 2014 г. Саратов: Саратовский источник, 2014. С. 207–211.
5. www.comsol.com (дата обращения 28.11.2016).
6. www.ansys.com (дата обращения 28.11.2016).
7. www.qwed.com.pl (дата обращения 28.11.2016).
8. www.ansys.com (дата обращения 28.11.2016).
9. www.cst.com (дата обращения 28.11.2016).
10. Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М. Создание узкополосного фильтра терагерцового диапазона на основе нанокompозитных материалов и частотно-селективных проводящих поверхностей // Радиотехника. 2015. № 7. С. 55–57.
11. Курушин А. А. Использование каналов Флоке для моделирования периодической наноструктуры // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 11. С. 1–22.
12. Ушаков Н. М., Молчанов С. Ю. Моделирование диэлектрических свойств толсто пленочных полимерных нанокompозитов на основе полиэтилена низкой плотности в УВЧ-, СВЧ- и КВЧ-диапазонах радиоволн // Радиотехника. 2014. № 10. С. 63–67.
13. www.tydexoptics.com/en/products/thz_optics/thz_band_pass_filter (дата обращения 28.11.2016).
14. Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М. Узкополосный СВЧ-фильтр для миллиметрового диапазона длин волн // Academic science – problems and achievements: Proc. of the VII Conf. North Charleston, USA, 28–29.09.2015. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. Vol. 1. P. 162–165. (In Russian.)
15. Fabrication and characteristics of mesh band-pass filters / M. A. Tarasov, V. D. Gromov, G. D. Bogomolov, E. A. Otto, L. S. Kuzmin // Instruments and Experimental Techniques. 2009. Vol. 52, iss. 1. P. 74–78.

S. Yu. Molchanov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

N. M. Ushakov

Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

A. P. Krenitskiy, V. P. Meshanov

Central Institute of Measurement Equipment (Saratov)

Filter for Millimeter Waves with Narrow Bandwidth

Mathematical model and model sample of the bandpass with central frequency of 140 GHz were presented. Comparison of theoretical and experimental data in the range of 75...260 GHz was made. Advantages and shortcomings of the presented filter in comparison with the existing bandpasses were described.

Extremely high frequency, bandpass filter, nanocomposite, dielectric permittivity, periodic structure

Статья поступила в редакцию 03 октября 2016 г.

УДК 539.216.2

А. В. Тумаркин, А. Ю. Попов, М. В. Злыгостов, С. В. Разумов,
А. Г. Гагарин, А. Г. Алтынников
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние давления рабочего газа на компонентный состав и свойства тонких пленок титаната бария–стронция¹

Исследовано влияние давления рабочего газа и тока разряда в процессе ионно-плазменного распыления на параметры осаждаемых сегнетоэлектрических покрытий титаната бария–стронция. Поскольку давление рабочего газа влияет на длину термализации распыленных атомов, его изменение в процессе осаждения позволяет менять компонентный состав осаждаемой пленки. Изменение тока разряда приводит к изменению скорости роста пленки.

Высокочастотное магнетронное распыление, тонкие пленки, титанат бария–стронция, давление рабочего газа, компонентный состав, резерфордовское обратное рассеяние, длина термализации, атомно-силовая микроскопия

В настоящее время существует устойчивый интерес к сегнетоэлектрическим (СЭ) материалам, обусловленный возможностью создания на их основе электрически управляемых сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств [1]–[3]. Наиболее перспективными сегнетоэлектрическими материалами для СВЧ-применений являются твердые растворы титанатов бария и стронция $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (Barium Strontium Titanate – BST), электрофизические свойства которых изменяются в широких пределах [4]. В настоящее время на базе тонких пленок BST реализованы лабораторные макеты управляемых СЭ-конденсаторов с высокой добротностью [5] и фазовращателей для частотного диапазона вплоть до 60 ГГц [6], [7].

Механизмы зарождения и формирования пленочных слоев в основном определяются такими технологическими параметрами, как давление рабочего газа, парциальное давление химически активных газов, температура конденсации и скорость наращивания слоя. В свою очередь, температура [8] и скорость осаждения определяют степень пересыщенности паров, а снижение рабочего давления увеличивает энергию атомов в момент их осаждения.

Давление рабочего газа в процессе осаждения многокомпонентных покрытий является одним из основных технологических факторов, влияющих на скорость осаждения пленки, механизмы за-

рождения пленки на подложке и на ее дальнейший рост, что, в свою очередь, определяет такие важные структурные характеристики, как фазовый состав, размеры кристаллитов, морфологию поверхности пленки и качество переходных слоев. В связи с этим целью представленной в настоящей статье работы явилось исследование фазового и компонентного состава и структурных свойств пленок BST в зависимости от давления рабочего газа в процессе ионно-плазменного осаждения, исследование возможностей управления потоками компонентов, приходящих на подложку в процессе роста слоев.

Исследуемые в работе пленки BST были получены методом высокочастотного магнетронного распыления керамической мишени состава $Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO_3$ в атмосфере кислорода на подложках лейкосапфира (*r*-срез). Осаждение осуществлялось в течение 60 мин при температуре 800 °С. Варьируемый параметр – давление рабочего газа.

Морфология поверхности пленок исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Компонентный состав пленок анализировался методом рассеяния ионов средних энергий (РИСЭ), который является модификацией метода резерфордовского обратного рассеяния. Для каждого образца были получены энергетические спектры обратнорассеянных ионов в режиме произволь-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-05147 офи_м) и при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" (соглашение № 14.608.21.0002 от 27.10.2015 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60815X0002)).

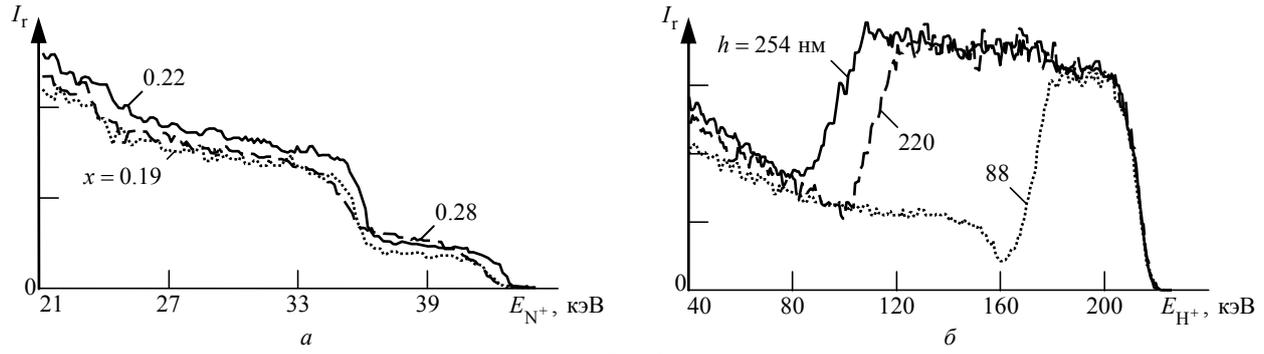


Рис. 1

ной ориентации их пучка. Измерения велись на ионах N^+ и H^+ при энергии ионов 227 кэВ. Обратнорассеянные ионы азота регистрировались электростатическим анализатором с углом рассеяния 120° , протоны – полупроводниковым спектрометрическим детектором и импульсным амплитудным анализатором с углом рассеяния 124° .

На рис. 1 представлены энергетические спектры $I_r(E)$, полученные в результате компьютерного моделирования. Путем сопоставления экспериментально измеренных и расчетных модельных спектров определялись состав пленок и их толщина. Измерения на азоте позволили с высокой точностью определить среднее соотношение Ba/Sr в диапазоне глубин 0...16 нм от поверхности (рис. 1, а). По измерениям на протонах определена толщина пленок (рис. 1, б). Технологические параметры получения образцов и данные по измеренному соотношению Ba/Sr и толщине пленок представлены в таблице.

В общем случае диапазон давлений рабочего газа в процессе ВЧ-магнетронного ионно-плазменного распыления сегнетоэлектрических керамических мишеней составлял 0.1...100 Па, что соответствует скоростям осаждения пленок порядка 10...0.1 нм/мин [2]. Изменяя давление рабочего газа, можно влиять на длину термализации [9], плотность потока и скорость доставки распыленных атомов к подложке, механизмы зародышеобразования на начальных стадиях осаждения, размеры кристаллитов и морфологию поверхности получаемого покрытия. Под длиной термализации понимается расстояние, на котором происходит уменьшение энергии распыленной частицы до тепловой за счет столкновений с атомами газо-

вой среды, после чего атомы достигают подложки в диффузионном режиме.

В процессе осаждения BST-пленок при малых давлениях кислорода длина зоны термализации тяжелых атомов Ba и Sr может превышать расстояние "мишень-подложка". Следовательно, на подложку они осаждаются как из прямого потока, так и в диффузионном режиме. Атомы бария как самые тяжелые дольше сохраняют прямолинейное направление движения и осаждаются преимущественно под зоной распыления. Таким образом, подложка, располагаемая в центре круговой зоны распыления, при низких давлениях оказывается обедненной барием и обогащенной стронцием [9]. Так как длина термализации определяется частотой столкновений распыленных частиц с атомами рабочего газа, то увеличение давления приводит к уменьшению длины термализации. Следовательно при увеличении давления рабочего газа плотность "диффузионного" потока приходящих на подложку атомов Ba будет возрастать и параметр стехиометрии x в пленке будет увеличиваться.

На рис. 2 приведены изображения поверхности BST-пленок, полученных при различных давлениях кислорода. Пленка, осажденная при 2 Па, сформирована из примерно одинаковых кристаллитов размером порядка 50 нм; шероховатость поверхности составляет порядка 5 нм. Пленка, полученная при давлении кислорода 60 Па, напротив, состоит из кристаллитов, сильно отличающихся по размеру, с рельефом порядка 15...20 нм.

С. А. Кукушкиным и В. В. Слезовым в [10] показано, что время жизни адатома на поверхности подложки сильно зависит от плотности потока компонентов, приходящих на подложку, т. е. от мощности источника осаждаемых атомов. В зависимости от плотности потока можно выделить сильные и слабые источники осаждаемого вещества [11], которым соответствуют высокие и низкие пересыщения соответственно. При сильных источниках скорость доставки атомов к подложке

Номер образца	Давление O_2 , Па	Ток разряда, мА	Компонентный состав: x	Измеренная толщина (h), нм
2115	2	180	0.19	254
2119	10	180	0.22	220
2126	60	180	0.28	88

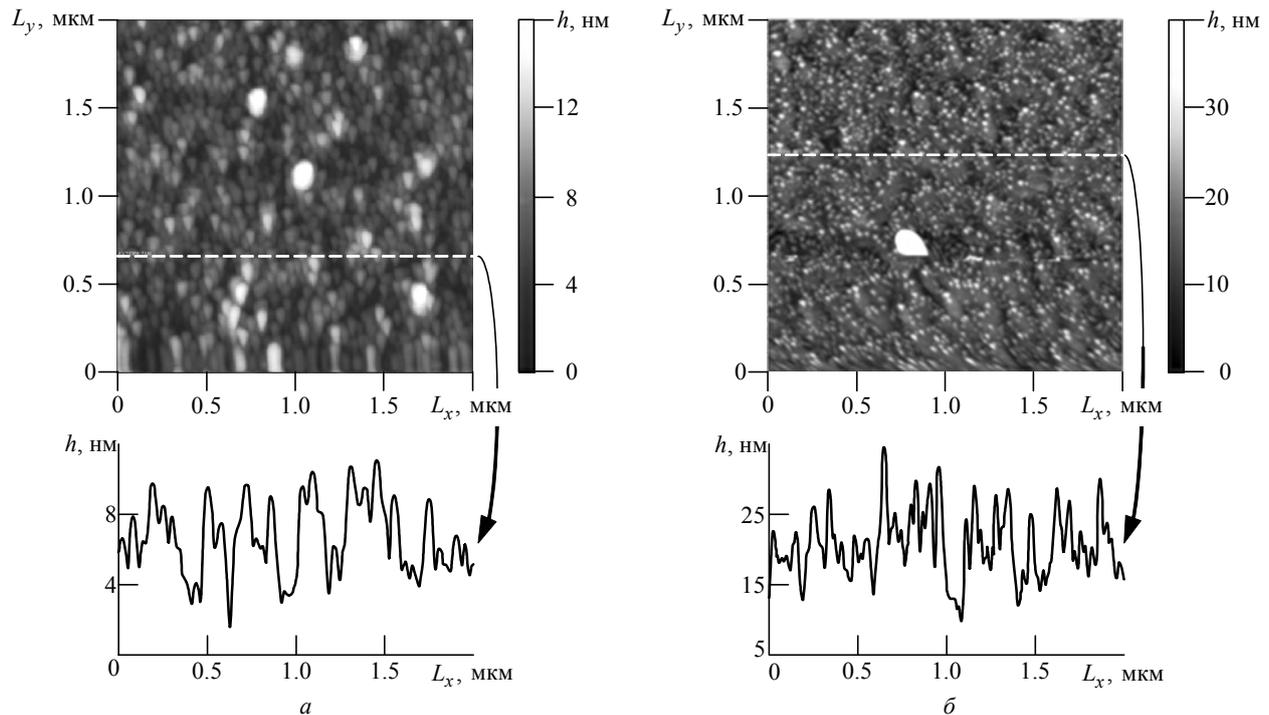


Рис. 2

обычно больше или равна скорости роста пленки. В этом случае многокомпонентная пленка состоит из мелких кристаллитов, имеющих практически одинаковый размер. При слабых источниках пленка имеет достаточное количество времени, чтобы поглотить все приходящие атомы таким образом, что пересыщение будет падать. При этом кристаллиты будут иметь сильный разброс по размерам.

В описанной работе исследовано влияние давления рабочего газа в процессе ионно-плазменного распыления на свойства осаждаемых СЭ-покрытий. Показано, что увеличение давления кислорода при осаждении многокомпонентных СЭ-оксидов мето-

дом ионно-плазменного распыления приводит к обогащению пленки тяжелым компонентом и, следовательно, увеличению параметра кристаллической решетки. Также показано, что изменение давления влияет на морфологию поверхности осаждаемой пленки. Кроме того, увеличение давления приводит к увеличению шероховатости и размера зерен. Следовательно, при изменении давления рабочего газа и создании в процессе роста пленки направленных потоков одних компонентов на подложку и диффузионных потоков других появляется возможность получать покрытия с переменным параметром x по толщине пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmed A., Goldthorp I. A., Khandani A. K. Electrically tunable materials for microwave applications // *Appl. Phys. Rev.* 2015. Vol. 2, iss. 1. P. 011302.
2. Gevorgian S. *Ferroelectrics in Microwave Devices, Circuits and Systems. Physics, Modelling, Fabrication and Measurements.* London: Springer, 2009. 416 p.
3. *Ferroelectric Materials for Microwave Tunable Applications* / K. Tagantsev, V. O. Sherman, K. F. Astafiev, J. Venkatesh, N. Setter // *J. of Electroceramics.* 2003. Vol. 11, iss. 1. P. 5–66.
4. *Advances in Ferroelectrics* / ed. by A. P. Barranco. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. 542 p.
5. Сверхвысокочастотные свойства сегнетоэлектрических варикондов на основе пленок $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ с Mg-содержащей добавкой / А. В. Тумаркин, Е. Р. Тепина, Е. А. Ненашева, Н. Ф. Картенко, А. Б. Козырев // *ЖТФ.* 2012. Т. 82, вып. 6. С. 53–57.
6. Волноводно-щелевой 60 ГГц фазовращатель на основе BSTO сегнетоэлектрической пленки / А. Б. Козырев, М. М. Гайдуков, А. Г. Гагарин, А. В. Тумаркин, С. В. Разумов // *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28, вып. 6. С. 51–56.
7. Millimeter-Wave Loaded Line Ferroelectric Phase Shifters / A. Kozyrev, A. Ivanov, O. Soldatenkov, A. Tumarkin, S. Ivanova, T. Kaydanova, J. D. Perkins, J. Alleman, D. S. Ginley, L. Sengupta, L. Chiu, X. Zhang // *Integrated Ferroelectrics.* 2003. Vol. 55. P. 847–852.
8. Влияние температуры подложки на начальные стадии роста пленок титаната бария-стронция на сапфире / А. В. Тумаркин, И. Т. Серенков, В. И. Сахаров, В. В. Афросимов, А. А. Одинец // *ФТТ.* 2016. Т. 58, вып. 2 С. 354–359.
9. Вольпяс В. А., Козырев А. Б. Термализация атомных частиц в газах // *ЖЭТФ.* 2011. Т. 140, вып. 1. С. 196–204.

10. Кукушкин С. А., Слезов В. В. Дисперсные системы на поверхности твердых тел. Механизмы образования тонких пленок (эволюционный подход). М.: Наука, 1996. 304 с.

11. Kukushkin S A. Evolution processes in multi-component and multiphase films // Thin Solid Films. 1992. Vol. 207, iss. 1-2. P. 302-312.

A. V. Tumarkin, A. Yu. Popov, M. V. Zlygostov, S. V. Razumov, A. G. Gagarin, A. G. Altynnikov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Influence of Deposition Pressure on Component Composition and Properties of Barium Strontium Titanate Thin Films

Influence of deposition pressure on the properties of ferroelectric barium strontium titanate thin films obtained by RF magnetron sputtering has been investigated. It has been shown that the deposition pressure affects the component composition of the films as the spatial zone of atomic particle thermalization changes significantly. Influence of deposition pressure on growth rate and, hence, on film thickness has been studied.

RF magnetron sputtering, thin films, barium strontium titanate (BST), deposition pressure, composition, Rutherford backscattering (RBS), thermalization distances, atomic-force microscopy

Статья поступила в редакцию 1 июля 2016 г.



Тематический указатель статей за 2016 г.

Цифры означают: первая – номер выпуска, вторая – номер начальной страницы статьи.

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

Арзумян А. Г., Севоян О. Ж., Гомцян О. А.

Синхронная система обработки и передачи данных с привязкой к шкале единого мирового времени..... 1, 3

Ермолаев В. Т., Флакман А. Г., Тираспольский С. А., Елохин А. В., Серебрякова Д. П., Косымов О. Д.

Эффективность линейной обработки сигналов в системах связи в условиях многолучевого ионосферного канала декаметрового диапазона..... 1, 8

Милащенко Е. А., Язовский А. А.

Амплитудное подавление негауссовских морских помех в когерентном полосовом тракте приемника..... 1, 14

Головков В. А.

Модели случайных процессов и особенности их использования при оптимальной линейной интерполяции и прогнозировании..... 1, 17

Клионский Д. М., Голубков А. М., Каплун Д. И., Куприянов М. С.

Исследование алгоритмов адаптации для обработки гидроакустических сигналов 1, 21

Шевченко М. Е., Задирако Д. О., Файзуллина Д. Н., Малышев В. Н., Стенюков Н. С., Шмырин М. С.

Методы и алгоритмы панорамного радиомониторинга при малоэлементных антенных решетках 2, 5

Подкопаев Б. П., Якшин А. С.

Функциональное диагностирование узлов радиосистем со статическими нелинейностями 2, 16

Аронов Л. А., Грачев С. В., Ушаков В. Н.

Спектроанализатор на основе волоконно-оптических дисперсионных элементов 2, 24

Климентьев В. П., Сергиенко А. Б.

Оценка состояния восходящего канала в системе множественного доступа с разреженным кодированием 2, 28

Мартынов М. И., Никитин Ан. А., Устинов А. Б.

Исследование СВЧ-свойств активной колебательной системы на основе ферритовой линии задержки 2, 37

Зиятдинов С. И.

Синтез рекурсивных дискретных фильтров во временной области..... 3, 3

Лось А. П., Розов А. К.

Способ некогерентного обнаружения повторяющихся сигналов 3, 7

Баруздин С. А.

Перестраиваемый согласованный фильтр светового диапазона 3, 12

Милащенко Е. А., Язовский А. А.

Амплитудное подавление негауссовских морских помех в некогерентном полосовом тракте приемника... 4, 3

Гомцян О. А.

Моделирование распределения числа символов двоичного сигнала дельта-модуляции..... 4, 7

Клюжев Е. С., Рябов И. В., Стрельников И. В., Юрьев П. М.

Теория и моделирование цифровых вычислительных синтезаторов..... 4, 10

Кольцов Н. Е., Носов Е. В., Гренков С. А., Федотов Л. В.

Измерение параметров сигналов в широкополосных приемно-регистрирующих каналах радиотелескопа..... 4, 19

Данилов В. А., Данилова Л. В.

Связь распределения огибающей квазигармонического случайного процесса с порождающим двумерным распределением 4, 25

Пыко С. А., Пыко Н. С., Маркелов О. А., Ульяницкий Ю. Д., Богачев М. И.

Исследование методов оценивания стабильности взаимного поведения стохастических процессов 4, 29

<i>Амплиев А. Е., Румянцев К. Е.</i>	
Вероятностные характеристики двухканального обнаружителя с инерционным однофотонным фотоэмиссионным прибором.....	5, 3
<i>Ахметсафина Р. З.</i>	
Цифровой компенсатор нелинейных искажений громкоговорителя на инверсной модели Гаммерштейна.....	5, 6
<i>Волков Р. А.</i>	
Оптимальный алгоритм оценивания координатно-информативных параметров MSK-сигналов пакетных радиосетей с неизвестным законом первичной модуляции на основе нелинейной чирплет-аппроксимации.....	5, 12
<i>Гоголев И. В.</i>	
Граница Крамера–Рао оценки доплеровской деформации и задержки сигнала с произвольной шириной спектра.....	6, 3
<i>Ахметсафина Р. З.</i>	
Об обратном модифицированном z-преобразовании при неизвестном значении параметра смещения.....	6, 7
<i>Аронов Л. А., Ерёмин И. О., Ушаков В. Н.</i>	
Влияние расходимости акустической волны на работу акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием.....	6, 12
Проектирование и технология радиоэлектронных средств	
<i>Савелькаев С. В., Заржецкая Н. В.</i>	
Расчет и проектирование автогенераторных СВЧ-устройств в пространстве S-параметров.....	1, 30
<i>Плотников В. В., Белявский П. Ю.</i>	
Исследование температурных зависимостей вольт-амперных характеристик тонкопленочных конденсаторов на основе твердых растворов титаната бария стронция.....	1, 38
<i>Куклин С. В., Тихомирова Г. В., Гудинов К. К., Двуреченский С. А.</i>	
Компьютерное моделирование светодиодного осветителя с фоконной оптикой для видеопроектора.....	3, 18
<i>Баскакова А. Э., Тургалиев В. М., Холодняк Д. В.</i>	
Перестраиваемый полосно-пропускающий фильтр на элементах с сосредоточенными параметрами с независимым непрерывным управлением центральной частотой и шириной полосы пропускания.....	3, 25
<i>Афанасьев В. П., Мухин Н. В., Редька Д. Н., Шарипова И. А.</i>	
Влияние лазерного отжига на структуру, оптические и электрические свойства тонких пленок оксида цинка.....	3, 32
<i>Ланкин В. Е., Шашкин А. К.</i>	
Прогнозирование нестабильностей шкал синхронизации.....	4, 33
<i>Потапов А. Н.</i>	
Обобщенная формализация сопутствующих признаков функционирования информационных эрготехнических радиоэлектронных систем на основе их структурно-логических моделей.....	4, 39
<i>Инишаков Ю. М., Белов А. В.</i>	
Перестраиваемый активный фазовый RC-фазовый контур.....	4, 46
<i>Антипов М. Ю., Цицикян Г. Н.</i>	
Индуктивность прямоугольных контуров.....	6, 17
<i>Чу Чонг Шы</i>	
Компьютерное моделирование процессов роста тонких пленок при термическом вакуумном напылении.....	6, 22
Телевидение и обработка изображений	
<i>Обухова Н. А., Мотыко А. А.</i>	
Цифровая обработка изображений в экспертно-консультующей системе для дифференциальной диагностики состояний шейки матки.....	2, 42
<i>Баранов П. С., Манцетов А. А.</i>	
Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пиксела для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов.....	2, 49

<i>Лысенко Н. В., Мончак А. М.</i> Информационные модели телевизионной системы.....	2, 53
<i>Бутенко В. В.</i> Поиск границы радужки на изображении	3, 36
<i>Столбов П. В., Сиротинин В. И., Воронин А. В.</i> Матричная камера в составе телевизионной системы для обнаружения контактного провода.....	4, 50
<i>Лысенко Н. В., Игнатъева Н. В.</i> Спектрональная обработка изображений в задачах экологического мониторинга	6, 32
Электродинамика, микроволновая техника, антенны	
<i>Французов А. Д.</i> Оптимизация антенной решетки с косекансной диаграммой направленности.....	1, 44
<i>Головков А. А., Можжаева Е. И.</i> Ограничение полосы согласования приемных штыревых антенн нефостеровскими цепями.....	2, 59
<i>Любина Л. М., Сугак М. И.</i> Добротность ленточного вибраторного излучателя в составе двухслойной бесконечной антенной решетки.....	2, 63
<i>Козлов Д. С.</i> Влияние взаимной связи излучателей на характеристики диаграммы направленности фазированной антенной решетки в области подавления излучения	2, 69
<i>Русаков А. С.</i> Печатная сверхширокополосная антенна с узкими полосами запираания	3, 40
<i>Любина Л. М.</i> Расширение полосы рабочих частот вибраторной фазированной антенной решетки с помощью пассивных планарных элементов.....	3, 49
<i>Гладышева М. А., Немов А. В.</i> Модификация метода Esprit для обработки данных в плоских фазированных антенных решетках	4, 56
<i>Балландович С. В., Любина Л. М., Одинцов А. Ю., Сугак М. И.</i> Предельная добротность электрически малых антенн, вписанных в цилиндр и эллипсоид	5, 23
Радиолокация и радионавигация	
<i>Леонтьев В. В., Пименов А. А.</i> Обоснование выбора математической модели морской поверхности при решении задачи радиолокационного экологического мониторинга	2, 75
<i>Липаков Н. Е.</i> Применение единого точного времени в системе ранговой синхронизации подвижных абонентов	3, 54
<i>Шишанов С. В.</i> Способ устранения неоднозначности измерения координат в многоцелевой обстановке для многопозиционной сверхширокополосной РЛС.....	5, 30
<i>Кваснов А. В.</i> Метод отождествления радиоизлучающих целей пространственно-разнесенными пассивными радиоэлектронными станциями на основе t-критерия Стьюдента.....	5, 35
<i>Соколов А. И., Юрченко Ю. С.</i> Использование пространственной информации при комплексировании инерциальных и радиотехнических систем летательных аппаратов	5, 41
<i>Мионов О. С.</i> Режим высокой частоты повторения импульсов в сверхширокополосной радиолокации	5, 47
<i>Орлов В. К., Рамаданов В. С.</i> Коррекции относительных координат по дальности по методу максимального правдоподобия	6, 38
Микро- и наноэлектроника	
<i>Зубко С. П., Гагарин А. Г., Медведева Н. Ю.</i> Эффективная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки в составе плоскопараллельных и планарных конденсаторов.....	1, 51

<i>Тарасов С. А., Ламкин И. А., Евсеенков А. С., Михайлов И. И., Соломонов А. В.</i> Селективные фоточувствительные структуры на основе барьера Шотки Au–AlGaN	1, 54
<i>Летавин Д. А., Чететкин В. А., Мительман Ю. Е.</i> Метод уменьшения размеров микрополосковых мостовых устройств	5, 52
<i>Винник Д. А., Устинова И. А., Устинов А. Б.</i> Исследование замещенных алюминием монокристаллов гексаферрита бария–свинца Ba _{1-x} Pb _x Fe _{12-y} Al _y O ₁₉ , полученных методом спонтанной кристаллизации	6, 45

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

<i>Афанасьев В. П., Теруков Е. И.</i> Тонкие пленки аморфного гидрогенизированного кремния и солнечные модули на их основе	2, 106
<i>Афанасьев В. П., Васильев А. В.</i> Спектры фотопроводимости пленок аморфного гидрогенизированного кремния с нанокристаллическими включениями	5, 57

Электроника СВЧ

<i>Никитин Ал. А., Устинов А. Б., Никитин Ан. А., Семенов А. А.</i> Исследование волновых процессов в феррит-сегнетоэлектрическом магнетонном кристалле на щелевой линии передачи	2, 80
<i>Витько В. В., Никитин А. А., Устинов А. Б., Устинова И. А., Семенов А. А.</i> Исследование влияния проводимости металлических электродов на СВЧ-свойства магнетонных кристаллов	3, 63
<i>Платонов Р. А., Алтынников А. Г., Ястребов А. В., Михайлов А. К., Козырев А. Б.</i> Электрически управляемая структура с периодическим изменением волнового сопротивления для отклонения основного луча высоконаправленного излучателя миллиметрового диапазона длин волн	3, 67
<i>Кошкидько В. Г., Алпатова О. В.</i> Эквивалентный поверхностный импеданс щелевой импедансной нагрузки, построенной на основе отверстия в стенке плоскопараллельного волновода, в составе бесконечной решетки	4, 63
<i>Попов Д. А., Устинов А. Б.</i> Исследование спектра дипольно-обменных спиновых волн в нормально намагниченных ферромагнитных пленочных волноводах	4, 70
<i>Тумаркин А. В., Разумов С. В., Гагарин А. Г., Чернявский А. М., Ялымов Н. А., Злыгостов М. В., Потешкина А. А., Уваренкова Ю. А., Иванова В. И.</i> Структура и свойства тонких пленок титаната-цирконата бария и титаната-станната бария для сверхвысокочастотных применений	5, 61
<i>Одинец А. А., Тумаркин А. В.</i> Доменный эпитаксиальный рост сегнетоэлектрических пленок титаната бария–стронция на сапфире	5, 65
<i>Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М., Креницкий А. П., Мещанов В. П.</i> Фильтр для миллиметрового диапазона длин волн с узкой полосой пропускания	6, 49
<i>Тумаркин А. В., Попов А. Ю., Злыгостов М. В., Разумов С. В., Гагарин А. Г., Алтынников А. Г.</i> Влияние давления рабочего газа на компонентный состав и свойства тонких пленок титаната бария–стронция	6, 53

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

<i>Степанов Б. Г.</i> Бионические акустические системы и устройства	2, 98
--	-------

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

<i>Адоньев О. А., Котов Д. В., Плутешко А. В., Блинников А. А., Зайцев А. В., Маслов П. В.</i> Методика измерений X-параметров мощного СВЧ-усилителя S-диапазона	5, 69
---	-------

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

<i>Красичков А. С.</i> Принципы построения и базовое алгоритмическое обеспечение систем удаленного мониторинга состояния здоровья больных с нарушениями сердечно-сосудистой системы	2, 85
<i>Потрахов Н. Н., Бессонов В. Б., Косов В. О., Грязнов А. Ю., Жамова К. К., Подымский А. А.</i> Способ оценки качества точечного сварного соединения	2, 94

Авторский указатель статей за 2016 г.

Цифры против фамилии и инициалов автора означают: первая – номер выпуска, вторая – номер начальной страницы статьи.

Адоньев О. А.	5, 69	Клюжев Е. С.	4, 10	Потрахов Н. Н.	2, 94
Алпатов О. В.	4, 63	Козлов Д. С.	2, 69	Пыко Н. С.	4, 29
Алтынников А. Г.	3, 67; 6, 53	Козырев А. Б.	3, 67	Пыко С. А.	4, 29
Амплиев А. Е.	5, 3	Кольцов Н. Е.	4, 19	Разумов С. В.	5, 61; 6, 53
Антипов М. Ю.	6, 17	Косов В. О.	2, 94	Рамаданов В. С.	6, 38
Арзуманян А. Г.	1, 3	Косымов О. Д.	1, 8	Редька Д. Н.	3, 32
Аронов Л. А.	2, 24; 6, 12	Котов Д. В.	5, 69	Розов А. К.	3, 7
Афанасьев В. П.	2, 106; 3, 32; 5, 57	Кошкидько В. Г.	4, 63	Румянцев К. Е.	5, 3
Ахметсафина Р. З.	5, 6; 6, 7	Красичков А. С.	2, 85	Русаков А. С.	3, 40
Балландович С. В.	5, 23	Креницкий А. П.	6, 49	Рябов И. В.	4, 10
Блинников А. А.	5, 69	Куклин С. В.	3, 18	Савелькаев С. В.	1, 30
Баранов П. С.	2, 49	Куприянов М. С.	1, 21	Севоян О. Ж.	1, 3
Баруздин С. А.	3, 12	Ламкин И. А.	1, 54	Семенов А. А.	2, 80; 3, 63
Баскакова А. Э.	3, 25	Ланкин В. Е.	4, 33	Сергиенко А. Б.	2, 28
Белов А. В.	4, 46	Леонтьев В. В.	2, 75	Серебрякова Д. П.	1, 8
Бутенко В. В.	3, 36	Летавин Д. А.	5, 52	Сиротинин В. И.	4, 50
Белявский П. Ю.	1, 38	Липаков Н. Е.	3, 54	Соколов А. И.	5, 41
Бессонов В. Б.	2, 94	Лось А. П.	3, 7	Соломонов А. В.	1, 54
Богачев М. И.	4, 29	Любина Л. М.	2, 63; 3, 49; 5, 23	Стенюков Н. С.	2, 5
Васильев А. В.	5, 57	Лысенко Н. В.	2, 53; 6, 32	Степанов Б. Г.	2, 98
Винник Д. А.	6, 45	Мальшев В. Н.	2, 5	Столбов П. В.	4, 50
Витько В. В.	3, 63	Манцветов А. А.	2, 49	Стрельников И. В.	4, 10
Волков Р. А.	5, 12	Маркелов О. А.	4, 29	Сугак М. И.	2, 63; 5, 23
Воронин А. В.	4, 50	Маркелов О. А.	4, 29	Тарасов С. А.	1, 54
Гагарин А. Г.	1, 51; 5, 61; 6, 53	Мартьянов М. И.	2, 37	Теруков Е. И.	2, 106
Гладышева М. А.	4, 56	Маслов П. В.	5, 69	Тираспольский С. А.	1, 8
Гоголев И. В.	6, 3	Медведева Н. Ю.	1, 51	Тихомирова Г. В.	3, 18
Головков А. А.	2, 59	Мещанов В. П.	6, 49	Тумаркин А. В.	5, 61; 5, 65; 6, 53
Головков В. А.	1, 17	Милащенко Е. А.	1, 14; 4, 3	Тургалиев В. М.	3, 25
Голубков А. М.	1, 21	Миронов О. С.	5, 47	Уваренкова Ю. А.	5, 61
Гомцян О. А.	1, 3; 4, 7	Мительман Ю. Е.	5, 52	Ульяницкий Ю. Д.	4, 29
Грачев С. В.	2, 24	Михайлов А. К.	3, 67	Устинов А. Б.	2, 37; 2, 80; 3, 63; 4, 70; 6, 45
Гренков С. А.	4, 19	Михайлов И. И.	1, 54	Устинова И. А.	3, 63; 6, 45
Грязнов А. Ю.	2, 94	Можжаева Е. И.	2, 59	Ушаков В. Н.	2, 24; 6, 12
Гудинов К. К.	3, 18	Молчанов С. Ю.	6, 49	Ушаков Н. М.	6, 49
Данилов В. А.	4, 25	Мончак А. М.	2, 53	Файзуллина Д. Н.	2, 5
Данилова Л. В.	4, 25	Мотыко А. А.	2, 42	Федотов Л. В.	4, 19
Двуреченский С. А.	3, 18	Мухин Н. В.	3, 32	Флакман А. Г.	1, 8
Евсеев А. С.	1, 54	Немов А. В.	4, 56	Французов А. Д.	1, 44
Елохин А. В.	1, 8	Никитин Ал. А.	2, 80	Холодняк Д. В.	3, 25
Еремин И. О.	6, 12	Никитин Ан. А.	2, 37; 2, 80; 3, 63	Цицикян Г. Н.	6, 17
Ермолаев В. Т.	1, 8	Носов Е. В.	4, 19	Чернявский А. М.	5, 61
Жамова К. К.	2, 94	Обухова Н. А.	2, 42	Чечеткин В. А.	5, 52
Задирако Д. О.	2, 5	Одинец А. А.	5, 65	Чу Чонг Шы.	6, 22
Зайцев А. В.	5, 69	Одинцов А. Ю.	5, 23	Шарилова И. А.	3, 32
Заржецкая Н. В.	1, 30	Орлов В. К.	6, 38	Шашкин А. К.	4, 33
Зиатдинов С. И.	3, 3	Пименов А. А.	2, 75	Шевченко М. Е.	2, 5
Злыгостов М. В.	5, 61; 6, 53	Платонов Р. А.	3, 67	Шишанов С. В.	5, 30
Зубко С. П.	1, 51	Платников В. В.	1, 38	Шмырин М. С.	2, 5
Иванова В. И.	5, 61	Плутешко А. В.	5, 69	Юрченко Ю. С.	5, 41
Игнатьева Н. В.	6, 32	Подкопаев Б. П.	2, 16	Юрьев П. М.	4, 10
Иншаков Ю. М.	4, 46	Подымский А. А.	2, 94	Язовский А. А.	1, 14; 4, 3
Каплун Д. И.	1, 21	Попов А. Ю.	6, 53	Якшин А. С.	2, 16
Кваснов А. В.	5, 35	Попов Д. А.	4, 70	Ялымов Н. А.	5, 61
Климентьев В. П.	2, 28	Потапов А. Н.	4, 39	Ястребов А. В.	3, 67
Клионский Д. М.	1, 21	Потешкина А. А.	5, 61		

Наши авторы

Алтынников Андрей Геннадиевич

Кандидат технических наук (2010), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – физика твердого тела; волновые процессы; СВЧ-микросистемная электроника.

Тел.: +7 (921) 972-79-22.

E-mail: a.altynnikov@gmail.com

Антипов Михаил Юрьевич

Магистр физики, закончил в 2015 Санкт-Петербургский государственный университет. Сфера научных интересов – теория перколяции; компьютерное моделирование.

Тел.: 8 (812) 748-54-42.

E-mail: posich@mail.ru

Аронов Леонид Андреевич

Магистр (2006) техники и технологии по направлению "Телекоммуникации", ассистент кафедры теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – оптическая обработка информации.

Тел.: 8 (812) 234-64-19.

E-mail: aronov.tor@gmail.com

Ахметсафина Римма Закиевна

Кандидат технических наук (1990), доцент (2001) Департамента программной инженерии факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики". Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – идентификация объектов управления; компьютерная графика; обработка сигналов.

Тел.: +7 (985) 279-07-38.

E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

Винник Денис Александрович

Кандидат технических наук (2009), заведующий лабораторией (2014) лаборатории роста кристаллов НОЦ "Нанотехнологии" Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" (Челябинск). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – выращивание монокристаллов, изучение их структуры и свойств.

Тел.: +7 (951) 457-22-86.

E-mail: vinnikda@susu.ru

Гагарин Александр Геннадиевич

Кандидат технических наук (2005), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – физика твердого тела; СВЧ-микросистемная электроника.

Тел.: 8 (812) 234-48-09

E-mail: aggagarin@gmail.com

Гоголев Иван Васильевич

Магистр (2014) по направлению "Инфокоммуникационные системы", аспирант кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер 2-й категории (2012) научно-исследовательской лаборатории АО «НИИ "Вектор"» (Санкт-Петербург). Автор семи научных публикаций. Сфера научных интересов – пассивная радиолокация, статистическая радиотехника.

Тел.: +7 (921) 090-48-57.

E-mail: pacific-182@mail.ru

Ерёмин Илья Олегович

Студент 1-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиотехника и телекоммуникации.

Тел.: 8 (812) 234-64-19.

E-mail: ilya.eryomin@gmail.com

Злыгостов Михаил Владимирович

Магистр электроники и наноэлектроники (2016), аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – технология материалов СВЧ-микросистемной электроники; физика твердого тела.

Тел.: +7 (911) 833-36-32.

E-mail: lkinrj@gmail.com

Игнатъева Наталья Владимировна

Кандидат технических наук (1978), доцент (1991), доцент кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Область научных интересов – прикладные телевизионные системы, исследования информационных характеристик многоспектральных преобразователей информации, многопрофильная обработка цветных и спектрально-пространственных изображений, комплексирование процедур обнаружения и распознавания различных объектов в реальном времени.

Тел.: 8 (812) 346-28-52.

E-mail: peregodovanv@yandex.ru

Креницкий Александр Павлович

Кандидат физико-математических наук (1988), исполнительный директор АО "Центральный научно-исследовательский институт измерительной аппаратуры (ЦНИИИА)" (Саратов). Автор более 190 научных работ. Сфера научных интересов – терагерцовые технологии.

Тел.: 8 (8452) 27-12-80.

E-mail: market@cime.ru

Лысенко Николай Владимирович

Доктор технических наук (2000), профессор (2002), заведующий кафедрой телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – передача информации в гетерогенных системах, в частности в видеоинформационных системах различного назначения; критерии и методы оценки качества функционирования видеоинформационных систем.
Тел.: 8 (812) 346-28-52.
E-mail: nvlysenko@etu.ru

Мецанов Валерий Петрович

Кандидат технических наук (1974), доктор технических наук (1985), профессор, руководитель филиала кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А. в АО "Центральный научно-исследовательский институт измерительной аппаратуры (ЦНИИИА)" (Саратов). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – синтез СВЧ-систем.
Тел.: 8 (8452) 74-02-72.
E-mail: nika373@bk.ru

Молчанов Сергей Юрьевич

Инженер (2011, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.) по специальности "Радиофизика", аспирант названного университета. Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и нанокompозитные материалы.
Тел.: 8 (904) 243-99-73.
E-mail: canishe@yandex.ru

Орлов Владимир Константинович

Кандидат технических наук (1984), доцент (1992) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – радионавигационные системы, в частности системы межсамолетной навигации.
Тел.: 8 (812) 346-18-03.
E-mail: v.k.orloff@gmail.com

Попов Александр Юрьевич

Бакалавр электроники и нанoeлектроники (2014), студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – технология материалов СВЧ-микроелектроники.
Тел.: +7 (921) 410-99-67.
E-mail: aporov_spb@mail.ru

Разумов Сергей Владимирович

Старший научный сотрудник межфакультетской лаборатории "ПУЛЬС" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более

100 научных работ. Сфера научных интересов – физика твердого тела; СВЧ-микроелектроника; технология материалов СВЧ-микроелектроники.
Тел.: 8 (812) 234-59-80.
E-mail: avtumarkin@yandex.ru

Рамаданов Василий Сергеевич

Магистр по направлению "Радиотехника" (2014), инженер 1-й категории АО «Концерн "Океанприбор"», аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – системы межсамолетной навигации; комплексирование ИНС и ГНСС; теория оценивания.
Тел.: 8 (812) 320-80-40.
E-mail: finimpres@gmail.com

Тумаркин Андрей Вилевич

Кандидат технических наук (1999), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – технология материалов СВЧ-микроелектроники; физика твердого тела.
Тел.: +7 (952) 379-22-07.
E-mail: avtumarkin@yandex.ru

Устинов Алексей Борисович

Доктор физико-математических наук (2012), профессор (2015) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные свойства колебаний и волн намагнитченности в ферромагнитных пленках и слоистых структурах на их основе; разработка СВЧ-микроелектронных приборов.
Тел.: 8 (812) 234-99-83.
E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com

Устинова Ирина Александровна

Бакалавр электроники и нанoeлектроники (2015) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – спиновые волны и устройства на основе ферритовых пленок и феррит-сегнетоэлектрических слоистых структур.
Тел.: +7 (921) 306-26-61.
E-mail: ustinovairin@yahoo.com

Ушаков Виктор Николаевич

Доктор технических наук (1992), профессор (1994), заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – оптическая обработка информации.
Тел.: 8 (812) 234-15-84.
E-mail: VNUshakov1@mail.ru.

Ушаков Николай Михайлович

Кандидат физико-математических наук (1980), доктор физико-математических наук (2001), профессор, заведующий лабораторией субмикронной электроники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники (СФ ИРЭ). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – нанокompозитные материалы, распространение радиоволн и электродинамика различных сред и структур. Тел.: 8 (917) 213-91-18.
E-mail: nmu@bk.ru

Цицикян Георгий Николаевич

Доктор технических наук (1990), профессор (2000), начальник отдела, ученый секретарь научно-технического совета филиала "ЦНИИ СЭТ" ФГУП "Крыловский государственный научный центр". Автор более 100

научных работ. Сфера научных интересов – электродинамические силы; электромагнитная совместимость; качество электроэнергии в судовой электротехнике. Тел.: 8 (812) 369-94-91.
E-mail: george.20021940@mail.ru.

Чу Чонг Шы

Магистр (2015) по направлению "Конструирование и технология электронных средств", аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – технология создания тонких пленок; компьютерное моделирование физических процессов. Тел.: +7 (962) 703-79-87.
E-mail: chusu171@mail.ru

**Требования к оформлению статей, предлагаемых для публикации в журнале
"Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника"**

В редакционный совет журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами;
- электронную копию статьи (CD либо DVD). По предварительному согласованию с редсоветом допустима передача по электронной почте;
- отдельный файл для каждого рисунка и каждой таблицы в формате тех редакторов, в которых они были подготовлены (также возможна передача по электронной почте по предварительному согласованию). Размещение рисунка в электронной копии статьи не освобождает от его представления отдельным файлом;
- элементы заглавия на английском языке (1 экз.);
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и на английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (отдела) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

Авторы вправе представить вместе с авторскими материалами рецензию независимого специалиста. Подпись рецензента должна быть заверена по месту его работы. За редакцией сохраняется право учесть представленную рецензию или провести рецензирование.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см; колонтитулы – верхний 2 см, нижний 2 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта 10.5 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Распечатка подписывается всеми авторами.

Элементы заглавия публикуемого материала

1. УДК (выравнивание по левому краю).
2. Перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми.
3. Место работы авторов. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.
4. Название статьи.
5. Аннотация – 3–7 строк, характеризующих содержание статьи.
6. Реферат – текст объемом до 1000 знаков, характеризующий содержание статьи; необходим для размещения статьи в базе данных.
7. Ключевые слова – 3–10 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится.

Каждый элемент заглавия приводится с новой строки.

Основной текст

Шрифт "Times New Roman" 10.5 pt, выравнивание по ширине, абзацный отступ 0.6 см, межстрочный интервал "Множитель 1.1".

Используются постраничные подстрочные ссылки (шрифт "Times New Roman" 8 pt, выравнивание по ширине; межстрочный интервал "Одинарный"), имеющие сквозную нумерацию в пределах статьи.

Список литературы

1. Строка с текстом "Список литературы".
2. Собственно список литературы – библиографические описания источников, выполненные по ГОСТ 7.1–2008 "Библиографическое описание документа". Каждая ссылка с номером – в отдельном абзаце. В ссылках на материалы конференций обязательно указание даты и места их проведения; при ссылках на статьи в сборниках статей обязательно приводятся номера страниц, содержащих данный материал.

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются.

При ссылках на материалы, размещенные на электронных носителях, необходимо указывать электронный адрес до конкретного материала (т. е. включая сегмент, оканчивающийся расширением, соответствующим текстовому документу) и дату обращения к нему либо полный издательский номер CD или DVD. Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

При ссылках на переводную литературу необходимо отдельно привести ссылку на оригинал.

При ссылках на источники на русском языке необходимо дополнительно привести перевод ссылки на английский язык с указанием после ссылки "(in Russian)". Формат перевода должен соответствовать формату, принятому в журналах IEEE.

Элементы заглавия на английском языке

Элементы включают:

1. Перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми.
 2. Место работы авторов. Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.
 3. Название статьи (перевод названия, указанного перед текстом).
 4. Резюме (abstract) статьи объемом до 0.5 с., кратко излагающее постановку задачи, примененные методы ее решения, полученные результаты. Допустимы ссылки на рисунки и таблицы, приведенные в основном тексте.
 5. Аннотация (перевод аннотации, указанной перед текстом).
 6. Ключевые слова (перевод списка ключевых слов, указанного перед текстом).
- Каждый элемент заглавия приводится с новой строки.

Верстка формул

Формулы подготавливаются в редакторе формул MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Формулы, как правило, выключаются в отдельную строку; в тексте допустимо расположение только однострочных формул, на которые нет ссылок (надстрочные и подстрочные символы в таких формулах допустимы).

Выключенные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер (при необходимости) заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста.

Необходимо использовать следующие установки редактора формул. **Размеры:** "полный" 10.5 pt, "подстрочный" 9 pt, "под-подстрочный" 7 pt, "символ" 14.5 pt, "подсимвол" 12.5 pt. **Стили:** текст, функция, число, кириллица – шрифт "Times New Roman", вектор-матрица – шрифт "Times New Roman", жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт "Symbol", прямой; переменная – шрифт "Times New Roman", курсив. Индексы, представляющие собой слова, сокращения слов или аббревиатуры, набираются только в прямом начертании.

Скобки и знаки математических операций вводятся с использованием шаблонов редактора формул MathType.

Начертание обозначений в формулах и в основном тексте должно быть полностью идентично. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы. После нее ставится запятая, а на следующей строке без абзацного отступа после слова "где" приводятся все обозначения и через тире – их расшифровки; список должен быть составлен в порядке появления обозначений в формуле; в многострочных формулах вначале полностью описывается числитель, а затем – знаменатель; изменение индекса также считается введением нового обозначения, требующего новой расшифровки.

Если при расшифровке встречается обозначение, в свою очередь требующее формульной записи и расшифровки, то с ним поступают как с отдельной формулой, но расшифровку помещают в круглые скобки.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio и т. п.) в черно-белом виде. Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tiff, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Качество рисунков и фотографий должно быть не менее 300 dpi.

В поле рисунка должны размещаться только сам рисунок и его нумерационный и тематический заголовки. Под рисунком размещаются нумерационный заголовок и через точку – тематический. Строка (строки), содержащая заголовки, центрируется относительно рисунка. Переносы в словах в этой области недопустимы.

Описание самого рисунка и введенных на нем обозначений следует приводить в основном тексте статьи.

Каждый рисунок вместе с заголовком должен помещаться в текстовое поле или в поле объекта (в терминах Microsoft Word).

Следует стремиться к горизонтальному размеру рисунка, равному 16.5 или 7.9 см (в первом случае рисунок будет заверстан вразрез текста, во втором – в оборку).

Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт "Times New Roman", курсив, 9 pt) ставятся под фрагментом перед нумерационным заголовком; в тексте ссылка на фрагмент ставится после нумерационного заголовка через запятую (например, рис. 1, а).

Рисунок размещается в ближайшем возможном месте после первого упоминания его или его первого фрагмента в тексте. Первая ссылка на рисунок приводится, например как (рис. 3), последующие – как (см. рис. 3).

Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1 pt, вспомогательные (выноски, оси, размерные линии) – 0.6 pt.

При формировании рисунка, представляющего собой схему, следует придерживаться требований ГОСТ, ЕСКД, ЕСПД (в частности, недопустимо использовать условные графические обозначения, соответствующие стандартам США и Европы, но не совпадающие с предусмотренными ГОСТ).

На рисунках, представляющих собой графики зависимостей, не следует делать размерную сетку, следует дать лишь засечки на осях, причем все засечки должны быть оцифрованы (т. е. всем засечкам должны соответствовать определенные числовые значения).

Если оси на рисунках оцифрованы, то они завершаются на позиции очередной засечки, где засечка не ставится, а вместо числовых значений даются обозначение переменной и (через запятую) единица измерения. Если оси не оцифровываются, то они завершаются стрелками, рядом с которыми даются обозначения переменных без единиц измерения.

Длины и шаг засечек следует устанавливать таким образом, чтобы на рисунке не было пустых областей, т. е. каждая засечка должна оцифровывать хотя бы некоторые точки одной из приведенных кривых.

Все текстовые фрагменты и обозначения на рисунке даются гарнитурой "Times New Roman" размером 9 pt с одинарным межстрочным интервалом; цифровые обозначения, буквенные обозначения фрагментов и нумерационный заголовок выделяются курсивом.

При необходимости в отдельных текстовых полях на рисунке могут помещаться обозначения и тексты, сформированные в редакторе формул; при этом следует использовать следующие установки редактора: размеры – "полный" 9 pt, "подстрочный" 7 pt, "под-подстрочный" 5.5 pt, "символ" 13 pt, "подсимвол" 11 pt.

Ссылки на обозначения на рисунке в основном тексте даются тем же начертанием (прямым или курсивным), как и на рисунке, но с размером шрифта 10.5 pt, соответствующим размеру основного текста.

Верстка таблиц

Текст в таблицах печатается через одинарный интервал, шрифтом "Times New Roman"; основной текст 9 pt, индексы 7 pt, подындксы 5.5 pt.

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного и тематического заголовков; головки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы).

Нумерационный заголовок содержит слово "Таблица" и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними, без точки на конце; выравнивается по правому полю таблицы и выделяется светлым курсивом). На следующей строке дается тематический заголовок (выравнивается по центральному полю таблицы и выделяется жирным прямым; после него точка не ставится). Ссылка в тексте на таблицу дается аналогично ссылке на рисунок. Нумерация таблиц – сквозная в пределах статьи. Если таблица единственная, нумерационный заголовок не дается, а ссылка в тексте приводится по типу "см. таблицу".

Над продолжением таблицы на новой странице ставится заголовок "Продолжение табл. 5" (если таблица на данной странице не оканчивается) или "Окончание табл. 5" (если таблица на данной странице оканчивается). Если таблица продолжается на одной или на нескольких последующих страницах, то ее головка должна быть повторена на каждой странице.

Ни один элемент таблицы не должен оставаться пустым.

Заголовки пишут в именительном падеже единственного или множественного числа без произвольного сокращения слов (допустимы только общепринятые сокращения всех видов: графические сокращения, буквенные аббревиатуры и сложносокращенные слова). Множественное число ставится только тогда, когда среди текстовых показателей графы есть показатели, стоящие во множественном числе.

В одноярусной головке все заголовки пишутся с прописной буквы. В двух- и многоярусных головках заголовки верхнего яруса пишутся с прописной буквы; заголовки второго, третьего и т. д. ярусов – с прописной буквы, если они грамматически не подчинены стоящему над ними заголовку верхнего яруса, и со строчной, если они грамматически подчинены ему.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты, при наличии – факс. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. В справке следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует группам специальностей научных работников 05.12.00 – "Радиотехника и связь", 05.27.00 – "Электроника" и 05.11.00 – "Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы" (в редакции приказа ВАК от 10.01.2012 № 5) и представляется следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и наноэлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Рукописи аспирантов публикуются бесплатно.

Адрес редакционного совета: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Издательство.
Технические вопросы можно выяснить по адресу radioelectronic@yandex.ru