

МЕТОД ТЕКСТУРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ

*Медведева Е.В., к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронных средств Вятского государственного университета,
e-mail: EMedv@mail.ru*

*Курбатова Е.Е., аспирант кафедры радиоэлектронных средств Вятского государственного университета,
e-mail: kurbatovae@gmail.com*

Ключевые слова: текстурная сегментация, цифровые полутоновые изображения, марковский процесс, энтропия, оценка вероятности перехода.

Введение

В системах космического мониторинга поверхности Земли для решения задач анализа изображений широко применяется сегментация, которая позволяет оперативно выделить на изображениях интересные области. Часто естественные сцены, такие как леса, поля лишены существенных деталей на больших пространствах и не имеют четко выраженных границ. В этом случае необходимо использовать идентификацию областей изображений на основе анализа их текстуры.

В ряде работ [1] показано, что для описания текстуры могут быть использованы марковские случайные поля. Однако при обработке цифровых полутоновых изображений (ЦПИ) с числом уровней яркости 2^g возникает проблема хранения в памяти и оперирования с матрицами вероятностей переходов размерностью $2^g \times 2^g$. Такая обработка ЦПИ требует больших вычислительных затрат.

В данной работе предложен метод текстурной сегментации ЦПИ на основе марковских случайных полей, позволяющий при меньших вычислительных затратах эффективно выделить протяженные области с однородными статистическими характеристиками.

Метод текстурной сегментации

Пусть g -разрядное ЦПИ представлено набором g разрядных двоичных изображений (РДИ). Полагается, что l -е РДИ ($l = \overline{1, g}$) представляет собой марковское случайное поле с разделимой автокорреляционной функций вида [2]:

$$r_{i,j} = \sigma_\mu^2 \exp\{-\alpha_1 |f| - \alpha_2 |s|\},$$

где i, j – дискретные пространственные координаты по горизонтали и по вертикали; σ_μ^2 – дисперсия двумерного дискретного марковского процесса; α_1, α_2 – множители, зависящие от ширины спектральной плотности мощности случайных процессов по двум измерениям; f, s – шаг корреляции по горизонтали и вертикали.

Предложен метод текстурной сегментации цифровых полутоновых изображений (ЦПИ) на основе двумерных цепей Маркова. В качестве текстурного признака используется оценка вероятности перехода между элементами изображения. Метод эффективно выделяет текстурные области с разными статистическими характеристиками и позволяет снизить вычислительные затраты.

В этом случае РДИ можно представить суперпозицией двух одномерных цепей Маркова по горизонтали и вертикали с двумя равновероятными значениями $M_1^{(l)}$, $M_2^{(l)}$ и матрицами вероятностей переходов по горизонтали ${}^1\Pi = \left\| \pi_{ij}^{(l)} \right\|_{2 \times 2}$ и вертикали ${}^2\Pi = \left\| \pi_{ij}^{(l)} \right\|_{2 \times 2}$.

На рис. 1 представлено одностороннее марковское случайное поле ЦПИ, разделенное на области $F_i^{(l)}$ ($i = \overline{1, 4}$), элементы которых являются цепью Маркова различной размерности. На рис. 2 представлен фрагмент двумерного l -го РДИ, соответствующего марковскому случайному полю области $F_4^{(l)}$, где приняты обозначения: $v_1^{(l)} = \mu_{i,j-1}^{(l)}$; $v_2^{(l)} = \mu_{i-1,j}^{(l)}$; $v_3^{(l)} = \mu_{i,j}^{(l)}$; $v_4^{(l)} = \mu_{i-1,j-1}^{(l)}$.

Выделение протяженных областей с разной текстурой на изображении сводится к вычислению их статистических характеристик: оценок вероятностей переходов по горизонтали ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ и вертикали ${}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ - для областей $F_2^{(l)}$, $F_3^{(l)}$ и оценки ${}^1\hat{\pi}_{iii}^{(l)}$ вероятности переходов в двумерной цепи Маркова - для области $F_4^{(l)}$. Предполагается, что текстурный признак (вероятности перехода между элементами ЦПИ) внутри одной области изменяется незначительно, а на разных областях принимает существенно различные значения. Учитывая, что основные детальные области выражены на старших разрядах ЦПИ, для их выделения необходимо обработать РДИ старших разрядов ЦПИ с наиболее выраженными текстурными признаками.

Вычисление оценки ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ вероятности перехода по горизонтали сводится к вычислению средней длины последовательности элементов одного знака [3]:

$${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = 1 - \frac{2P_1^{(l)}}{\hat{\chi}^{(l,r)}}, \quad (2)$$

где $\hat{\chi}^{(l,r)}$ – оценка средней длины последовательности одинаковых элементов l -го разряда на r -м шаге уточнения оценки.

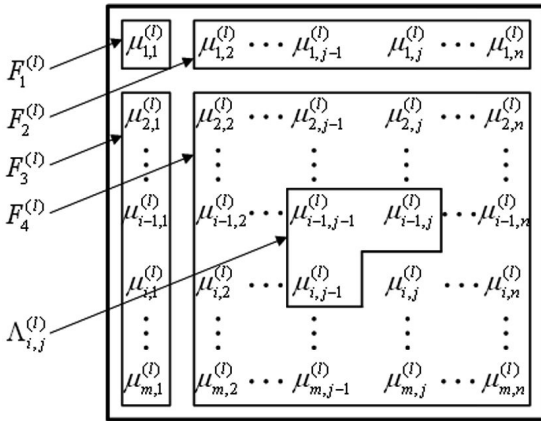


Рис. 1. Области одностороннего марковского случайного поля

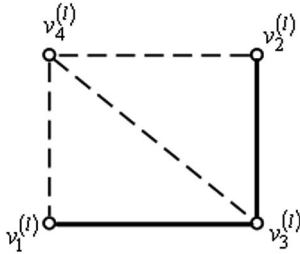


Рис. 2. Фрагмент области $F_4^{(l)}$

Для определения вероятности перехода $\pi_{iii}^{(l)}$ в двумерной цепи Маркова воспользуемся многомерной математической моделью изображения, синтезируемой в [4]. Вероятность состояния элемента $v_3^{(l)}$ области $F_2^{(l)}$ (рис. 1) определится энтропией элемента $v_3^{(l)}$ относительно состояний элементов ближайшей окрестности $\Lambda_{ij}^{(l)} = \{v_1^{(l)}, v_2^{(l)}\}$:

$$H(v_3^{(l)} | v_2^{(l)}, v_1^{(l)}) = -\log \frac{w(v_3^{(l)} | v_1^{(l)}) w(v_3^{(l)} | v_2^{(l)})}{w(v_3^{(l)} | v_2^{(l)}, v_1^{(l)})}, \quad (3)$$

где $w(v_3^{(l)} | v_1^{(l)})$, $w(v_3^{(l)} | v_2^{(l)})$ – одномерные плотности вероятностей перехода между соседними значениями; $w(v_3^{(l)} | v_1^{(l)}, v_2^{(l)})$ – плотность вероятности перехода в двумерной цепи Маркова.

Плотность вероятности перехода в двумерной двоичной цепи Маркова можно выразить в форме:

$$w(v_3^{(l)} | v_2^{(l)}, v_1^{(l)}) = \sum_{i,j,q=1}^2 \pi(v_3^{(l)} = M_i^{(l)} | v_1^{(l)} = M_j^{(l)}; v_2^{(l)} = M_q^{(l)}) \delta(v_1^{(l)} - M_j^{(l)}) \delta(v_2^{(l)} - M_q^{(l)}), \quad (4)$$

где $\delta(\cdot)$ - дельта функция.

На основании аргумента выражения (3) матрица $\Pi^{(l)}$ для различных сочетаний состояний элементов

окрестности $\Lambda_{ij}^{(l)}$ имеет вид:

$$\Pi^{(l)} = \begin{pmatrix} \pi_{iii}^{(l)} & \pi_{ijj}^{(l)} \\ \pi_{jii}^{(l)} & \pi_{jjj}^{(l)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1^{(l)} & \alpha_1'^{(l)} \\ \alpha_2^{(l)} & \alpha_2'^{(l)} \\ \alpha_3^{(l)} & \alpha_3'^{(l)} \\ \alpha_4^{(l)} & \alpha_4'^{(l)} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$i, j = \overline{1, 2}; i \neq j, l = \overline{1, g}$,

элементы которой симметричны и удовлетворяют условию нормировки $\alpha_q + \alpha_q'^{(l)} = 1$.

Элементы матрицы $\Pi^{(l)}$ (3) связаны с элементами матриц ${}^1\Pi^{(l)}$ и ${}^2\Pi^{(l)}$ следующими соотношениями

$$\begin{aligned} \alpha_1^{(l)} &= \pi_{iii}^{(l)} = \pi(v_3^{(l)} = M_1^{(l)} | v_1^{(l)} = M_1^{(l)}; v_2^{(l)} = M_1^{(l)}) = \\ &= M_1^{(l)} = {}^1\pi_{ii}^{(l)} \quad {}^2\pi_{ii}^{(l)} / {}^3\pi_{ii}^{(l)}; \\ \alpha_4^{(l)} &= 1 - \alpha_1^{(l)}; \\ \alpha_2^{(l)} &= \pi_{jii}^{(l)} = \pi(v_3^{(l)} = M_1^{(l)} | v_1^{(l)} = M_1^{(l)}; v_2^{(l)} = M_2^{(l)}) = \\ &= {}^1\pi_{ii}^{(l)} \quad {}^2\pi_{ij}^{(l)} / {}^3\pi_{ij}^{(l)}; \\ \alpha_3^{(l)} &= 1 - \alpha_2^{(l)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где ${}^3\pi_{ij}^{(l)}$ – элемент матрицы вероятностей переходов ${}^3\Pi^{(l)} = {}^1\Pi^{(l)} \times {}^2\Pi^{(l)}$.

Начиная со второй строки РДИ, используя множество элементов $\psi = \{v_1^{(l)}, v_2^{(l)}, v_3^{(l)}, v_4^{(l)}\}$ и ранее вычисленную оценку ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ вероятности переходов по горизонтали, вычисляются оценки ${}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ и $\hat{\pi}_{iii}^{(l)}$.

Учитывая локальные изменения статистических характеристик на изображении, для их вычисления используется метод «сканирующего окна» [5]. Размер окна задается исходя из заданной точности оценки и минимальных вычислительных затрат.

При обработке первых строк и столбцов изображения размер окна будет увеличиваться по мере увеличения номера обрабатываемого элемента, пока не достигнет заданных размеров. Размер окна на каждом этапе обработки определяется из пары соотношений:

$$\begin{aligned} m &= \overline{1, (2i-1)}, \quad i = \overline{2, (M-1)/2}; \\ n &= \overline{1, (2j-1)}, \quad j = \overline{2, (N-1)/2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где i, j – координаты обрабатываемого изображения, M, N – заданные ширина и высота сканирующего окна.

Усредняя оценки вероятностей переходов в пределах окна, вычисляется оценка средней вероятности перехода $\tilde{\pi}_{iii}^{(l)}$ для элемента, соответствующего центральному элементу окна:

$$\tilde{\pi}_{iii}^{(l,r,k)} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^n \hat{\pi}_{iii}^{(l,r,k)}. \quad (8)$$

На каждом последующем шаге окно перемещается на один элемент (слева-направо, сверху-вниз) и вычис-

ляется оценка средней вероятности перехода для каждого элемента РДИ.

Для выделения областей с разной текстурой вычисленная оценка $\tilde{\pi}_{iii}^{(l)}$ сравнивается с порогом. Пороговым значением H между двумя разными текстурными областями является оценка $\tilde{\pi}_{iii}^{(l)}$, которая для текстурных областей с разными вероятностными характеристиками может быть выбрана на основе анализа гистограмм изображения [6]. В случае, когда априорно известно, что изображение содержит области двух текстур с разными статистическими характеристиками, для их выделения будет достаточно двух меток (0 и 1). Всем элементам, для которых оценка $\tilde{\pi}_{iii}^{(l)}$ превышает порог, присваивается метка 1, остальным элементам – метка 0.

В случае, когда ЦПИ содержит несколько текстур, необходимо каждой из них присвоить свою метку. При этом используется несколько пороговых значений, соответствующих нескольким текстурам на изображении.

Результаты моделирования

Моделирование проводилось на искусственных и реальных изображениях. Формирование искусственных двоичных изображений осуществлялось с использованием двумерной математической модели изображения (3) и алгоритма, приведенного в [4].

Для оценки качества выделения текстурных областей вычислялось количество ошибочно сегментированных элементов (ESE), для определения которых сегментированное изображение сравнивалось с разметкой. Разметка – это изображение, используемое для формирования текстурного изображения, содержащее области с элементами одной яркости.

Качество выделения текстурных областей определяется размером скользящего окна. На рис. 3 представлен график зависимости количества ошибочно сегментированных элементов (ESE) от размера скользящего окна для разных значений вероятностей переходов, сегментируемых структур.

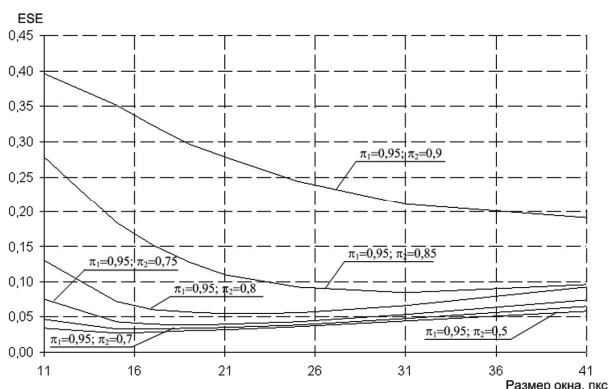


Рис. 3. Влияние размера окна на качество сегментации

Из приведенного графика следует, что размер окна зависит от вероятностей переходов текстур, которые присутствуют на изображении. Чем большие вероятности переходов имеют текстуры, тем больший размер окна требуется для их сегментации. Малые окна приво-

дят к значительной неоднородности сегментированных областей, но при этом позволяют точно локализовать границы областей.

Окна больших размеров обеспечивают однородность сегментированных областей, но при этом не удается точно определить границы областей. Приемлемым для большинства текстур и наиболее эффективным с точки зрения соотношения качество сегментации/время обработки является окно размером 21x21.

На рис. 4в приведен пример сегментации искусственного изображения размером 1024x1024 с четырьмя текстурными областями (рис. 4б), сгенерированного по разметке (рис. 4а), а также гистограмма текстурного признака изображения (рис. 4г). Изображение содержит области четырех текстур с матрицами вероятности переходов равными:

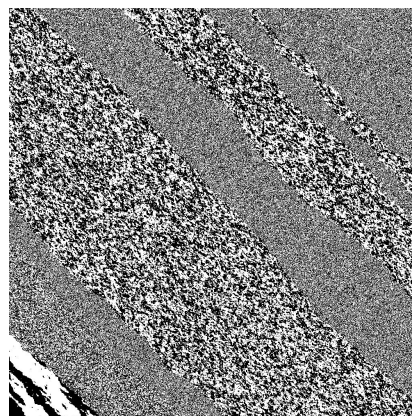
$${}^1\Pi = {}^2\Pi = \begin{bmatrix} 0,95 & 0,05 \\ 0,05 & 0,95 \end{bmatrix}, \quad {}^1\Pi = {}^2\Pi = \begin{bmatrix} 0,75 & 0,25 \\ 0,25 & 0,75 \end{bmatrix},$$

$${}^1\Pi = {}^2\Pi = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,4 \\ 0,4 & 0,6 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad {}^1\Pi = {}^2\Pi = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

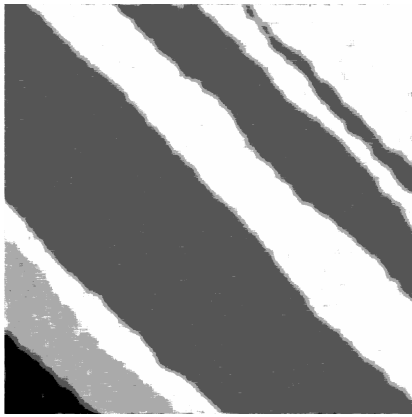
Количество пиков на гистограмме текстурного признака изображения соответствует количеству текстур на текстурном изображении. Пороговое значение выбирается как минимальное значение между двумя соседними пиками гистограммы. Выбрав порог по тестовому набору изображений с разными статистическими характеристиками, данное пороговое значение можно использовать для сегментации других изображений, содержащих области с такими же статистическими характеристиками.



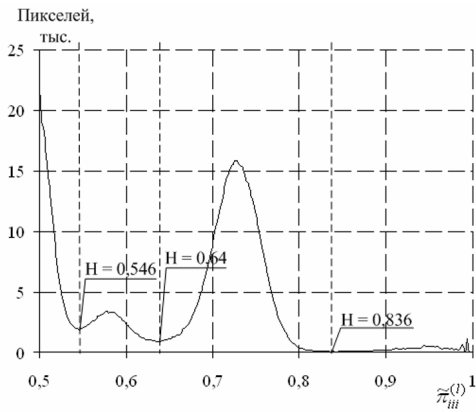
а)



б)



в)

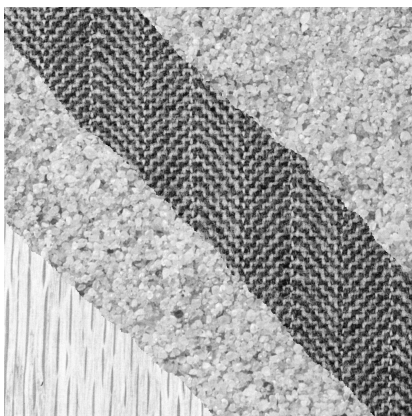


г)

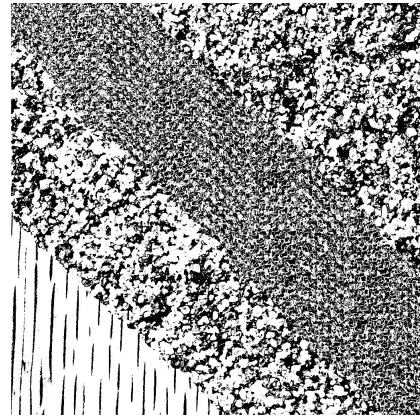
Рис. 4. Сегментация искусственных двоичных изображений:
 а) разметка; б) текстурное РДИ;
 в) сегментированное изображение;
 г) гистограмма текстурного признака

Количество ошибочно сегментированных элементов в приведенном примере составляет 5,2%.

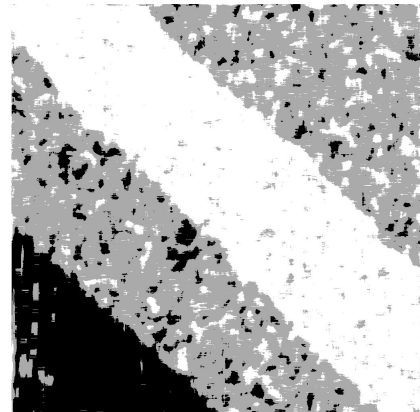
Для текстурной сегментации ЦПИ выбираются РДИ, на которых наиболее выражены текстурные области. На рис. 5 приведен пример сегментации изображения, полученного наложением естественных текстур на изображение разметки. Изображения естественных текстур получены из альбома текстур Бродатца [7], содержащий текстуры, встречающиеся в природе. Размер изображения 600x600. Сегментация осуществлялась по 7-му РДИ.



а)



б)



в)

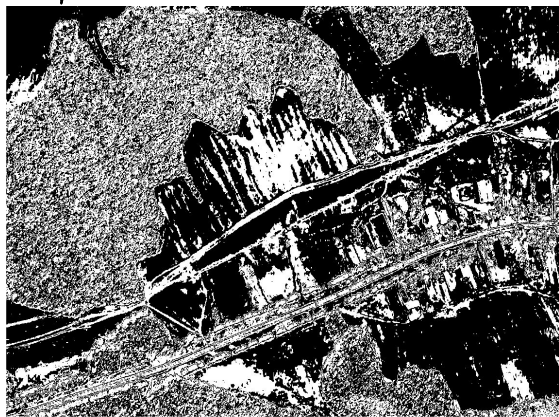
Рис. 5. Сегментация ЦПИ естественных текстур:
 а) ЦПИ; б) РДИ седьмого разряда ЦПИ;
 в) сегментированное изображение

Количество ошибочно сегментированных элементов (рис.4) составляет 12,7%. Качество сегментации естественных текстур несколько хуже, чем искусственных изображений. Это связано с неравномерностью освещения естественной сцены при съемке, что приводит к возникновению на изображении областей неоднородной яркости и, соответственно, к неточностям в результатах сегментации.

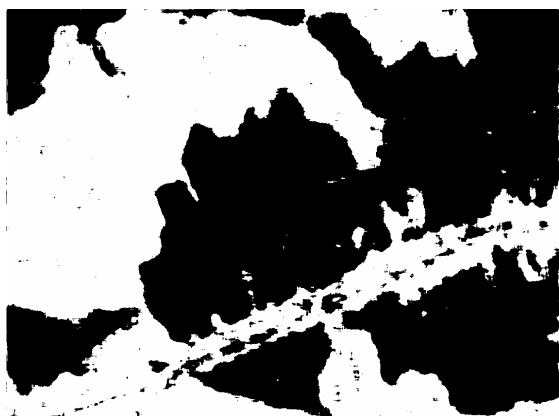
На рис. 6 приведен пример сегментации спутникового изображения (размер 1143x844), на котором эффективно выделена область леса. Сегментация осуществлялась по РДИ шестого разряда ЦПИ.



а)



б)



в)

Рис.6. Сегментация спутникового изображения:
а) ЦПИ; б) РДИ шестого разряда ЦПИ;
в) сегментированное изображение

Разработанный метод текстурной сегментации на основе марковских случайных полей эффективно выделяет протяженные области на ЦПИ с различной текстурой и позволяет снизить вычислительные ресурсы. Количество ошибочно сегментированных элементов составляет 2-14%. Разработанный метод может быть применен и для сегментации цветных изображений.

Литература

1. Ковтун И.В. Текстурная сегментация изображений на основе марковских случайных полей // Управляющие системы и машины. 2003. – № 4. – С. 46-55.
2. Хабиби, А. Двумерная байесовская оценка изображений / А. Хабиби // ТИИЭР. – 1972. - Т.60, №7. - С. 153-159.
3. Медведева Е.В. Метод вычисления информационных характеристик цифровых полутоновых изображений / Е. В. Медведева, Е.П. Петров // Инфокоммуникационные технологии, т.6, №3, 2008. - С.104-109.
4. Петров Е.П. Метод синтеза математических моделей видеоизображений на основе многомерных цепей Маркова / Е.П. Петров, Е. В. Медведева, А.П. Метелев // Нелинейный мир, № 4, 2011. - С.213-231.
5. Колодникова Н.В. Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов / Н.В. Колодникова // Доклады ТУСУРа. Автоматизированные системы обработки информации, управления и проектирования. – 2004. – с. 113-124.
6. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
7. Brodatz Textures // Signal and Image Processing Institute USC – URL: <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=textures>. – 24.02.2012.

METHOD OF TEXTURAL SEGMENTATION OF IMAGES BASED ON MARKOV CASUAL FIELDS

Medvedeva E.V., Kurbatova E.E.

The method of textural segmentation of digital halftone images (DHI) on the basis of two-dimension Markov chains is offered. The estimate of transition probability between elements of image is used as textural features. This method makes it possible to detect efficiently the extensive areas on the DHI with different textures and reduces computational resources.

Уважаемые коллеги!

Для тех, кто не успел оформить подписку на второе полугодие 2012 года через ОАО «Роспечать», сохраняется возможность приобретения журналов непосредственно в редакции по адресу:
107031, г. Москва, Рождественка, 6\9\20, стр. 1,
Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, или оформить заказ в соответствии с требованиями, выставленными на сайте журнала: www.dspra.ru.

Справки по телефонам: (495) 621-71-08, 621-06-10.
Факс: (495) 621-16-39. E-mail: rntores@mail.ru