

АДАПТИВНЫЙ ПРИЕМ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНЫМ ЗАКОНОМ МОДУЛЯЦИИ

А. Н. Цыбульник^а, канд. техн. наук, профессор

Н. А. Лешко^б, канд. техн. наук, доцент

^аФилиал Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Ярославль, РФ

^бВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: обнаружение воздушных объектов с использованием постороннего источника подсвета вызывает необходимость обеспечения согласованного приема сигналов с априорно неизвестными параметрами. Методы приема сигналов в условиях априорной параметрической неопределенности приводят к адаптивным алгоритмам.

Цель: получение алгоритмов совместного обнаружения и оценивания неизвестных параметров сигнала, представляющего собой аддитивную смесь частотно-модулированного сигнала с неизвестным значением несущей частоты, изменяющейся крутизной частотной модуляции, случайным отклонением фазы и частоты и белого шума. **Результаты:** с использованием уравнений нелинейного обнаружения и оценивания для предложенной модели сигнала получены алгоритмы работы и реализующая их структура оценочно-корреляционного приемного устройства, в котором можно выделить блок нелинейной фильтрации и блок обнаружения. По мере уточнения оценок неизвестных параметров перестраиваемый гетеродин подстраивается под сигнал, содержащийся во входном колебании.

Ключевые слова — априорная неопределенность, адаптация, частотно-модулированный сигнал, алгоритмы обнаружения и оценивания.

Введение

В настоящее время достаточно интенсивно исследуются методы и средства получения радиолокационной информации путем анализа прямых и отраженных от воздушных объектов сигналов посторонних радиоэлектронных средств [1–5]. Применение таких средств обеспечивает скрытность работы при получении информации о воздушной обстановке, а следовательно, приводит к повышению живучести информационных систем.

Используя посторонние источники подсвета для обнаружения воздушных объектов, необходимо добиться согласованного приема отраженных от целей сигналов с априорно неизвестными параметрами. Методы приема сигналов в условиях априорной неопределенности приводят к адаптивным алгоритмам [6–8].

Алгоритмы оптимального обнаружения и фильтрации параметров сигнала

Учитывая широту применения в радиолокации частотно-модулированных сигналов [9, 10] и предполагая число их неизвестных параметров конечным, на основе марковской теории нелинейной фильтрации [7] получим уравнения нелинейного оценивания и обнаружения для принимаемой на интервале времени $[0, t]$ реализации

$$y(t) = \begin{cases} S[\phi(t), t] + n(t), & Q = 1; \\ n(t), & Q = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\phi(t)$ — фаза сигнала; Q — параметр, характеризующий наличие или отсутствие сигнала.

Сигнал (1) представляет собой аддитивную смесь частотно-модулированного сигнала $S[\phi(t), t]$ с неизвестным значением несущей частоты, изменяющейся крутизной частотной модуляции, случайным отклонением фазы и частоты и шума, являющегося нормальным стационарным белым шумом с нулевым средним значением и дельта-функцией корреляции

$$\langle n(t) \rangle = 0;$$

$$\langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{1}{2}N_0\delta(t_2 - t_1).$$

В этом случае изменения фазы и частоты сигнала описываются системой линейных стохастических дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{\phi}(t) = n_1 + \Omega(t) + n_\phi(t) \\ \dot{\Omega}(t) = \gamma - \Delta\gamma\Omega(t) + n_\Omega(t) \end{cases} \quad (2)$$

где $\Omega(t)$ — частота сигнала, являющаяся случайным процессом; n_1 — случайная величина, характеризующая начальное значение частоты сигнала; $\Delta\gamma$ — постоянный коэффициент, не зависящий от времени и характеризующий ширину спектра изменения параметра $\Omega(t)$; γ — коэффициент, характеризующий начальное значение скорости частотной модуляции; n_ϕ, n_Ω — взаимно независимые белые гауссовы шумы, описывающие текущие отклонения фазы и частоты соответственно.

Фаза сигнала $\phi(t)$ является двумерным марковским процессом, характеризующимся коэффициентами переноса

$$A = \begin{bmatrix} a_\phi & a_\Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega + n_1 & \gamma - \Delta\gamma\Omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

и диффузии

$$B = \begin{bmatrix} b_{\phi\phi} & b_{\Omega\phi} \\ b_{\phi\Omega} & b_{\Omega\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_\phi}{2} + D_{n_1} & 0 \\ 0 & \frac{N_\Omega}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь и далее для сокращения записи индекс t (зависимость от времени) опущен.

Раскладывая функции a_ϕ , a_Ω в ряд Тейлора в окрестности их математических ожиданий, получим

$$A = \begin{bmatrix} m_\Omega + m_{n_1} & m_\gamma - m_{\Delta\gamma}m_\Omega \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Конкретизируя уравнения нелинейного оценивания и обнаружения [6]

$$\begin{aligned} \dot{K}_{ij} = & \sum_{q=1}^{u+l} K_{jq} \frac{\partial a_i}{\partial x_q} + \sum_{q=1}^{u+l} K_{iq} \frac{\partial a_j}{\partial x_q} + b_{ij} + \\ & + \frac{1}{N} (y(t) - S) \sum_{q,p=1}^u K_{iq} K_{jp} \frac{\partial^2 S}{\partial x_q \partial x_p} - \\ & - \frac{1}{N} \sum_{q,p=1}^u K_{iq} K_{jp} \frac{\partial S}{\partial x_q} \frac{\partial S}{\partial x_p}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{m}_i = a_i + \frac{1}{N} (y(t) - S) \sum_{q=1}^u K_{iq} \frac{\partial S}{\partial x_q}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} = & \frac{y(t)}{N} \left(S + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^u K_{ij} \frac{\partial^2 S}{\partial x_i \partial x_j} \right) - \\ & - \frac{1}{2N} \left[S^2 + \sum_{i,j=1}^u K_{ij} \left(S \frac{\partial^2 S}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial S}{\partial x_i} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

применительно к сигналу вида (1), получим

$$\begin{aligned} \dot{m}_\phi &= m_\Omega + m_{n_1} + \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_\Omega &= m_\gamma - m_{\Delta\gamma}m_\Omega + \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Omega\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_{n_1} &= \frac{A_0}{N} y(t) K_{n_1\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_\gamma &= \frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{m}_{\Delta\gamma} &= \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi} \cos[m_\phi(t)]; \\ \dot{K}_{\phi\phi} &= 2K_{\phi\Omega} + \frac{N_\phi}{2} + D_{n_1} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi}^2 \sin[m_\phi(t)]; \\ \dot{K}_{\phi\Omega} &= K_{\Omega\Omega} + K_{\Omega n_1} - K_{\phi\Omega}m_{\Delta\gamma} + K_{\phi\gamma} - K_{\phi\Delta\gamma}m_\Omega - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{K}_{\phi\gamma} = K_{\gamma n_1} + K_{\gamma\Omega} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{\gamma\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\phi\Delta\gamma} = K_{\Delta\gamma n_1} + K_{\Delta\gamma\Omega} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{\Delta\gamma\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\phi n_1} = K_{n_1\Omega} + K_{n_1 n_1} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\phi\phi} K_{n_1\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega\Omega} &= 2K_{\Omega\gamma} - 2m_\Omega K_{\Omega\Delta\gamma} - 2m_{\Delta\gamma} K_{\Omega\Omega} + \\ & + \frac{N_\Omega}{2} - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Omega\phi}^2 \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega\gamma} &= K_{\gamma\gamma} - K_{\gamma\Delta\gamma}m_\Omega - K_{\gamma\Omega}m_{\Delta\gamma} - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega\Delta\gamma} &= K_{\Delta\gamma\gamma} - K_{\Delta\gamma\Delta\gamma}m_\Omega - K_{\Delta\gamma\Omega}m_{\Delta\gamma} - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\Omega n_1} &= K_{n_1\gamma} - K_{n_1\Delta\gamma}m_\Omega - K_{n_1\Omega}m_{\Delta\gamma} - \\ & - \frac{A_0}{N} y(t) K_{n_1\phi} K_{\Omega\phi} \sin[m_\phi(t)]; \end{aligned}$$

$$\dot{K}_{\gamma\gamma} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi}^2 \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\gamma\Delta\gamma} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} K_{\Delta\gamma\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\gamma n_1} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\gamma\phi} K_{n_1\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{\Delta\gamma\Delta\gamma} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi}^2 \sin[m_\phi(t)];$$

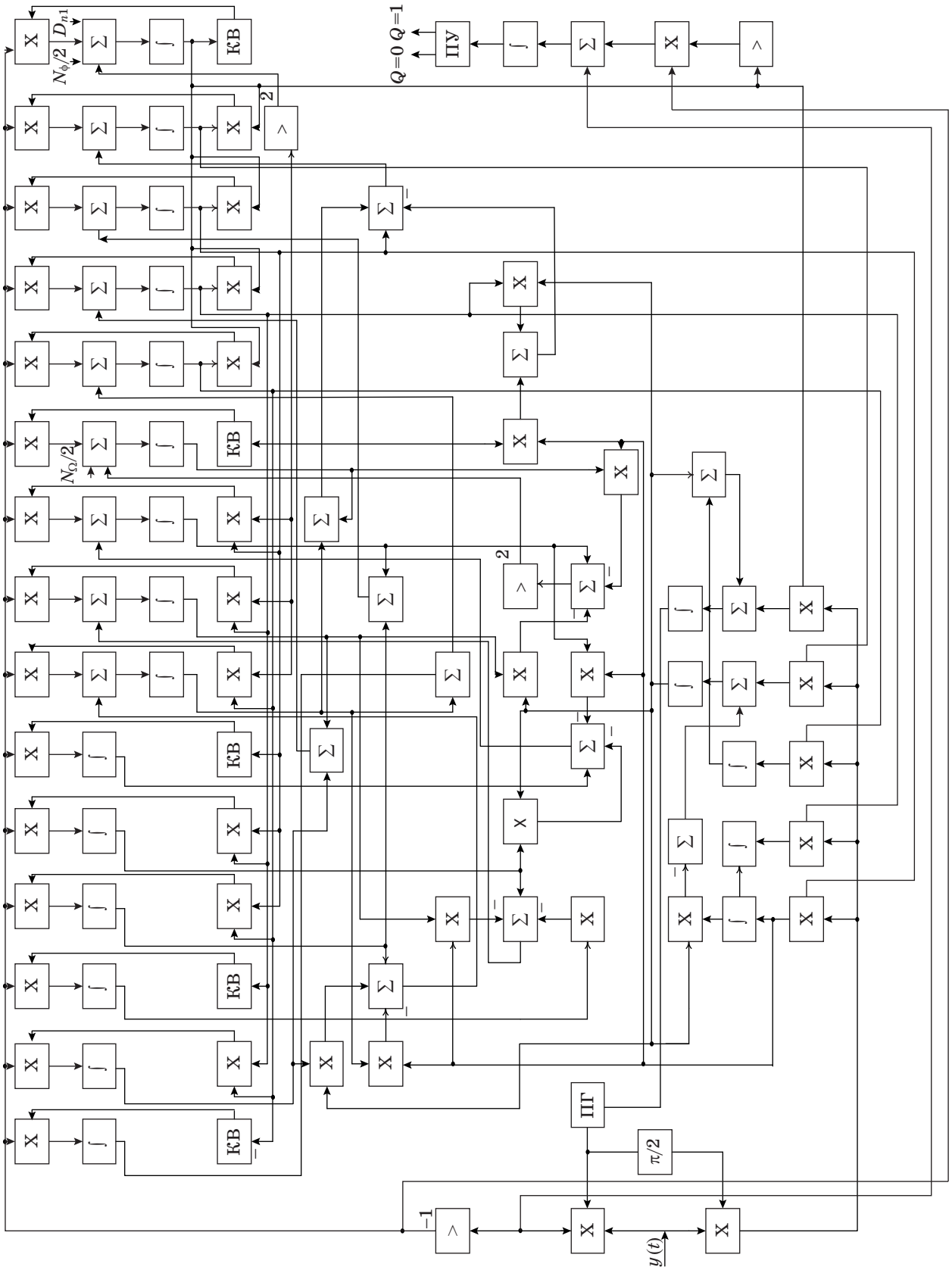
$$\dot{K}_{\Delta\gamma n_1} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{\Delta\gamma\phi} K_{n_1\phi} \sin[m_\phi(t)];$$

$$\dot{K}_{n_1 n_1} = -\frac{A_0}{N} y(t) K_{n_1\phi}^2 \sin[m_\phi(t)]; \quad (10)$$

$$\dot{z} = -\frac{A_0}{N} y(t) \sin[m_\phi(t)] - \frac{A_0}{N} y(t) \frac{K_{\phi\phi}}{2} \sin[m_\phi(t)]. \quad (11)$$

При выводе уравнений (9), (10) были опущены вибрационные члены с удвоенной частотой, дающие малый вклад в результате сглаживания в устройстве. Также в уравнении для логарифма отношения правдоподобия (11) отброшена константа $\frac{A_0^2}{4N}$, получающаяся от члена $\frac{A_0^2}{2N} \sin^2[m_\phi(t)]$ (ее можно включить в значение порога обнаружения).

Полученные уравнения определяют структурную схему оптимальной в гауссовом приближе-



■ Структура оптимального оценочно-корреляционного приемного устройства: КВ — квадрат; ПГ — перестраиваемый гетеродин; ПЧ — пороговое устройство

нии системы совместного обнаружения и оценивания сигнала вида (1), которая является оптимальной при обработке сигнала как в переходном, так и установившемся режимах работы. Структурная схема устройства, моделирующая (9)–(11), представлена на рисунке. Блок нелинейной фильтрации, описываемый уравнениями (9), (10), моделируется следящим устройством типа фазовой автоподстройки частоты с переменными коэффициентами усиления в цепях обратной связи. Блок обнаружения описывается выражением (11). Устройство относится к классу оценочно-корреляционных приемных устройств [8] и осуществляет оценку неизвестных параметров сигнала, его корреляционную обработку и обнаружение.

Заключение

Следует отметить, что оптимизация приема сигналов в условиях априорной неопределенности приводит к сложным алгоритмам (9)–(11) и необходимости моделировать большое число уравнений. Поэтому в ряде случаев, при наличии некоторых априорных сведений о неизвестных параметрах сигнала, предпочтительным является использование квазиоптимальных в гауссовом приближении алгоритмов обнаружения — измерения [7]. Возможность перехода к квазиоптимальным алгоритмам рассматривается с позиций допустимого снижения качества получаемых оценок и решается исходя из конкретных условий, в которых осуществляется прием сигналов.

Литература

1. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. В 2 кн. — М.: Техносфера, 2014. Кн. 2. — 680 с.
2. Willis N. J. *Bistatic Radar*. — SciTech Publishing, 2005. — 337 p.
3. Мельников Ю. П., Попов С. В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местопределения источников излучения. — М.: Радиотехника, 2008. — 432 с.
4. Пархоменко Н. Г., Перетяцько А. А., Чернятьев Ю. Н., Шевченко В. Н. Современное состояние методов скрытой радиолокации подвижных объектов // Радиоконтроль: науч.-техн. сб. ОАО «КБ «Связь». Ростов н/Д, 2013. Вып. 16. С. 21–42.
5. Ульянов Г. Н., Лаврентьев Е. А., Павлов И. Н. Эллипсо-гиперболический метод построения многопозиционных систем // Информационно-управляющие системы. 2011. № 3(52). С. 30–34.

6. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. — М.: Сов. радио, 1977. — 432 с.
7. Сосулин Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. — М.: Сов. радио, 1978. — 320 с.
8. Сосулин Ю. Г., Костров В. В., Паршин Ю. Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. — М.: Радиотехника, 2014. — 632 с.
9. История отечественной радиолокации/ под ред. А. С. Якунина, Ю. А. Кузнецова, А. А. Рахманова. — М.: Столичная энциклопедия, 2011. — 768 с.
10. Кочемасов В. Н., Белов Л. А., Оконешников В. С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. — М.: Радио и связь, 1983. — 191 с.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.46

Adaptive Reception of FM Signals with Unknown Modulation Pattern

Tsybulnik A. N.^a, PhD, Tech., Professor, CAN1956@mail.ru

Leshko N. A.^b, PhD, Tech., Associate Professor, Nikolai_ZRU@mail.ru

^aYaroslavl branch of A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 28, Moskovskii Pr., 150001, Yaroslavl, Russian Federation

^bA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Aerial object detection with a beam subsource assumes coordinated reception of signals with a priori unknown parameters. Methods of receiving such signals lead to adaptive algorithms. The goal of the research is obtaining algorithms for joint detection and estimation of unknown parameters of a signal which is an additive mixture of an FM signal with an unknown carrying frequency, varying modulation pattern, random changes in phase and frequency, and white noise. **Results:** Using the equations of non-linear detection and estimation for the proposed signal model, working algorithms have been obtained along with the respective structure of an estimative-correlative receiver which contains a non-linear filtration block and a detection block. As the unknown parameter estimations become more accurate, the adjustable heterodyne is tuned to fit the signal contained in the input oscillation.

Keywords — A priori Uncertainty, Adaptation, FM Signal, Detection and Estimation Algorithms.

References

1. *Spravochnik po radiolokatsii* [Directory on a Radar-Location]. Ed. by M. I. Skolnik. The lane with eng. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. Vol. 2. 680 p. (In Russian).
2. Willis N. J. *Bistatic Radar*. SciTech Publishing, 2005. 337 p.
3. Melnikov J. P., Popov S. V. *Radiotekhnicheskaja razvedka. Metody otsenki effektivnosti mestoopredeleniia istochnikov izlucheniia* [Radio Engineering is Millers' Investigation. Methods of an Estimation Efficiency of a Fixing Source of Radiation]. Moscow, Politehnika Publ., 2008. 432 p. (In Russian).
4. Parkhomenko N. G., Peretyatko A. A., Chernyatiev Y. N., Shevchenko V. N. The Current State of Methods of Covert Radar Moving Objects. *Radiokontrol'*, Rostov-on-Don, OAO «KB «Sviaz'» Publ., 2013, iss. 16, pp. 21–42 (In Russian).
5. Ulyanov G. N., Lavrentyev E. A., Pavlov I. N. Elliptical-Hyperbolic Method for Constructing Multi-Positioning Systems *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 3(52), pp. 30–34 (In Russian).
6. Repin V. G., Tartakovskii G. P. *Statisticheskii sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptatsiia informatsionnykh system* [Statistical Synthesis at the Prior Indeterminacy and Adaptation of Intelligence Systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 432 p. (In Russian).
7. Sosulin I. G. *Teoria obnaruzheniia i otsenivaniia stokhasticheskikh signaiov* [Theory of Detection and Estimation of Stochastic Signals]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 320 p. (In Russian).
8. Sosulin I. G., Kostrov V. V., Parshin I. N. *Otsenochno-korreliatsionnaja obrabotka signalov i kompensatsiia pomekh* [It is Estimating and Correlative Processing of Signals and Compensation of Hindrances]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 632 p. (In Russian).
9. *Istoriia oteshestvennoi radiolokatsii* [History of a Domestic Radar-Location]. A. S. Iakunin, I. A. Kuznetsov, A. A. Rakhmanov eds. Moscow, Stolichnaia entsiklopediia Publ., 2011. 320 p. (In Russian).
10. Kochemasov V. N., Belov L. A., Okoneshnikov V. S. *Formirovanie signalov s lineinoi chastotnoi moduliatsiei* [Formation of Signals with the Linear frequency modulation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1983. 191 p. (In Russian).

Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
 ВЫХОДИТ КАЖДЫЕ ДВА МЕСЯЦА.

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: informnauka3@yandex.ru,

сайт: <http://www.informnauka.com>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru>/

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2014 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy>).

Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2014 гг. вы можете заказать в редакции по льготной цене.