

СИНТЕЗ МНОГОПОЗИЦИОННОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ ИСТОЧНИКА АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ПО НЕПОЛНЫМ И ЗАШУМЛЕННЫМ ДАННЫМ

Bulakovska A.O. Synthesis of multi-position detector acoustic noise source with incomplete and noisy data. The modified method of successive analysis of acoustic noise signals, arising up at expiration of liquid or gas from the through defect of pipeline being under pressure, is developed. The results of theoretical analysis of algorithm of detection and measurement are resulted.

In the oil and gas pipelines under pressure, there is a danger of explosions (through defects, holes). For efficient detection and location of breaks in pipelines under the ground or under water, has developed a computerized system for remote detection methods with multi site tomographic detection on incomplete and noisy data. The detector-meter circuit, and results of the qualitative analysis of the time characteristics are shown.

Keywords: computerized system, tomographic detection, noisy data, multi site detection, spatial coherentness, Radon Transform

Булаковська А.О. Синтез багатопозиційного пристрою виявлення джерела акустичного шуму за неповними і зашумленими даними. Розроблений модифікований метод послідовного аналізу акустичних шумових сигналів, що виникають при витіканні рідини або газу з кризного дефекту трубопроводу, що знаходиться під тиском. Для оперативного виявлення і визначення місця розташування розривів в трубопроводах розроблена комп'ютеризована система дистанційного виявлення методами багатопозиційного томографічного виявлення за неповними і зашумленими даними. Наведено схему і результати аналізу часових характеристик детектора.

Ключові слова: комп'ютеризована система, томографічне виявлення, зашумлені дані, багатопозиційне виявлення, просторова когерентність, перетворення Радона

Булаковская А.А. Синтез многопозиционного обнаружителя источника акустического шума по неполным и зашумленным данным. Разработан модифицированный метод последовательного анализа акустических шумовых сигналов, возникающих при истечении жидкости или газа из сквозного дефекта трубопровода, находящегося под давлением. Для оперативного обнаружения и определения местоположения разрывов в трубопроводах разработана компьютеризованная система дистанционного обнаружения методами многопозиционного томографического обнаружения по неполным и зашумленным данным. Приведена схема и результаты анализа временных характеристик обнаружителя.

Ключевые слова: компьютеризованная система, томографическое обнаружение, зашумленные данные, многопозиционное обнаружение, пространственная когерентность, преобразование Радона

I. Введение

Определение мест утечек жидкости из трубопроводов под давлением является серьезной проблемой, особенно для скрытых трубопроводов [1]. В этом случае приходится применять методы дистанционного зондирования с комбинированным (линейным и угловым) сканированием датчиков акустических шумов.

Наибольшую информативность для определения мест утечек имеют функции когерентности и взаимной корреляции. Эти функции имеют существенные различия для случаев отсутствия и наличия утечек: в первом случае они не имеют выраженных областей выбросов, а во втором такие выбросы наблюдаются. Функция когерентности является, по существу, взаимной спектральной плотностью принимаемых сигналов. С ее помощью оценивается ширина спектра сигнала утечки, что позволяет сделать обоснованный выбор полосы анализа для оценивания функции взаимной корреляции.

Поставленная задача осложняется наличием помех, шумов разного характера, неоднородностей среды распространения сигнала. По существу, это задача обнаружения случайного сигнала на фоне случайных помех и шумов. Математическое описание случайных сигналов и помех сводится к определению их статистических характеристик и

обоснованному выбору вероятностных распределений, которыми наиболее адекватно описываются выборки данных на входах датчиков.

Для получения оптимального решения необходимо разработать математическую модель входных воздействий, на основе которой можно предложить алгоритм распознавания и построить структурные схемы устройств. Данной проблеме и посвящена представленная работа.

II. Постановка задачи

В работах [1, 2] рассмотрена линейная система обнаружения, состоящая из M пассивных датчиков (приемников), на входы которых поступают полезный сигнал и L мешающих сигналов. Пусть датчики расположены вдоль оси X . В каждом датчике имеется приемная антенна с диаграммой направленности (ДН) $G(\phi, \theta)$. Обозначим ширину ДН на уровне половинной мощности по оси X через $\Delta\phi_{0,5}$, по оси Y через $\Delta\theta_{0,5}$. Предполагается, что диапазон $\phi_{\min} \dots \phi_{\max}$ углов прихода сигналов от источника на любой из датчиков лежит в пределах $\Delta\phi_{0,5}$. Также положим, что координата x_s излучающего источника лежит в пределах $[x_1, x_n]$, где $x_i, i = \overline{1, M}$ – координаты приемников.

Сигналы от каждого датчика поступают по линиям передачи данных в устройство совместной обработки. В датчиках и линиях передачи данных имеются внутренние шумы. Степень пространственной когерентности полезных и мешающих сигналов зависит как от характеристик источников, так и от геометрических соотношений в системе [1-3].

При комбинированном сканировании датчиков задача оценивания спектральных и корреляционных характеристик принимаемых шумовых сигналов усложняется: вместо дискретного преобразования Фурье необходимо применять дискретное веерное преобразование Радона [5]. При этом пространственный спектр поля, рассеянного источником шума, представляет собой набор пространственных частот, которые определяются величинами соответствующих углов $\theta_i, i = 1, 2, \dots, N$.

Далее рассмотрим задачу синтеза обнаружителя-измерителя на основе преобразования Радона с регуляризацией.

III. Синтез обнаружителя-измерителя на основе модифицированного преобразования Радона

Томографическая обработка информации возможна как в частотной, так и в пространственной областях. При обработке в частотной области, строго говоря, сечение пространственного спектра под некоторым углом $\theta_k = \phi_k$ есть двумерное преобразование Фурье от проекции плотности рассеяния под углом ϕ_k или одномерное преобразование Фурье в системе координат $\{x_{\theta_k}, y_{\theta_k}\}$ вдоль координаты y_{θ_k} , повернутой относительно оси ординат Y на угол θ_k . Однако, если для реального рассеиваемого акустического шума выполняется условие квазимонохроматической аппроксимации $\Delta f / f_0 \ll 1$, где Δf – ширина спектра шума, f_0 – средняя частота шумового сигнала, можно приближенно считать, что результирующий принимаемый сигнал $G_k(x_k, y_k)$ с направления θ_k представляет собой функцию следующего вида:

$$G_k(x_k, y_k) = \begin{cases} g_{\text{прм}}(x_k, y_k) & \text{при } (x_k^2 + y_k^2)^{1/2} = 2/\lambda; \\ 0 & \text{при } (x_k^2 + y_k^2)^{1/2} \neq 2/\lambda, \end{cases} \quad (1)$$

где x_k, y_k – проекции пространственной частоты спектра под углом θ_k на оси f_x, f_y

пространственно-частотной плоскости. Тогда общее выражение для пространственного спектра изображения при многопозиционном приеме запишется в следующем виде:

$$G_k(x_k, y_k) = G(f_{xk}, f_{yk}) = \sum_{k=1}^N g_k(x_k, y_k) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda \sec(\beta/2)} \left[y_k \cos\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_k}{2}\right) - x_k \sin\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_k}{2}\right) \right] \right\} =$$

$$= \sum_{k=1}^N g_k(x_k, y_k) \exp \left\{ -j2\pi(f_{xk}x_k + f_{yk}y_k) \right\}, \quad (2)$$

где $f_{xk} = 2 \sin\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_k}{2}\right) / \left[\lambda \sec\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \right]$, $f_{yk} = -2 \cos\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_k}{2}\right) / \left[\lambda \sec\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \right]$ –

пространственные частоты спектра акустического шума, трансформированные при многопозиционном приеме. Коэффициент трансформации $\sec^{-1}(\beta_k/2)$ зависит от угла β_k между направлениями лучей первого и k -го приемников.

Таким образом, в многопозиционной системе с узкополосными в обычном (частотном) смысле акустическими сигналами получаем набор томографических проекций источника на нескольких пространственных частотах, которые определяются величинами соответствующих углов θ_k .

При обработке в частотной области в соответствии с выражениями (3-4) получаем совокупность точек в полярном растре, т.е. в координатах (ρ, φ) . Поэтому логично использовать интегральные преобразования также в полярных координатах, т.е. преобразования Радона [2, 7]. Как известно [8], операции над интенсивностями в полярных координатах осуществляются в рамках метода обратных проекций на основе свертки. Каждый набор проекций при использовании этого метода может обрабатываться независимо от остальных, что значительно упрощает построение алгоритма обработки.

Поскольку функция $\hat{G}(\rho, \theta)$ обрабатывается в ограниченной полосе пропускания приемника, она является функцией с ограниченной вариацией [10].

Примечание: Говорят, что функция $f(x)$, определенная на отрезке $[a, b]$, имеет на этом отрезке *ограниченную вариацию*, если найдется такая константа K , что для любого разбиения отрезка $[a, b]$ точками $x_0 = a < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ выполняется неравенство

$$\sum_{i=1}^n |f(x_i) - f(x_{i-1})| \leq K.$$

Следовательно, и функция $\hat{g}(r, \varphi)$ как линейное преобразование $\hat{G}(\rho, \theta)$ будет функцией с ограниченной вариацией. Если к такой функции применить регуляризацию при точных значениях исходных данных ($G_i(\rho, \theta) = 0$), то регуляризованное решение равномерно по (x, y) или, что то же самое, по (r, φ) , сходится к точному решению при $\alpha \rightarrow 0$. Поэтому в дальнейшем проведем только количественный сравнительный анализ ошибок из-за регуляризации и наличия помех.

Весовые окна являются осесимметричными. Ось симметрии совпадает с вертикальной осью системы пространственно-частотных координат. Взвешиваются данные только по координате ρ . Однако при обработке данных в сегменте, ограниченном диапазоном углов $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$, необходимо применять взвешивание и по координате θ .

При выборе метода взвешивания координате θ необходимо учитывать следующие факторы.

1. Наборы данных являются сильно разреженными.
2. Последовательности отсчетов по θ неэквидистантны.
3. Мешающие сигналы (например, точечных источников помех) могут обладать весьма

специфическими пространственными характеристиками (например, со знакочередующимися коэффициентами пространственной корреляции).

При использовании равномерного взвешивания ($k(\theta) = 1$ при $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$, $k(\theta) = 0$ при других θ) достигается наивысшее разрешение, но имеют место пульсации Гиббса. Их наличие приводит к появлению дополнительных артефактов в восстанавливаемом изображении. Для борьбы с такими помехами в условиях неполных и неэквилидистантных последовательностей можно эффективно применять оценивание спектра по методу максимума энтропии [9,12].

Запишем выражение для оценки изображения источника акустического шума на плотной сетке пространственно-частотных координат θ_k (без взвешивания по θ):

$$\hat{g}(n_r, \varphi_k) = \sum_{m_0=-M}^M g_{\theta m_p}(n_r, \varphi_k) \exp \left[-j \frac{2\pi m_0 n_r}{kN} \cos(\theta_m - \varphi_k) \right].$$

В направлениях $\theta_m = \varphi_k$ весовые коэффициенты определяются априорными пространственно-корреляционными характеристиками акустического шума. В качестве таких характеристик можно использовать некоторые усредненные по результатам экспериментальных исследований статистики акустических шумов, возникающих при разрывах (свищах) в трубопроводах, находящихся под давлением [6].

Во всех остальных направлениях весовые коэффициенты должны выбираться по критерию максимума энтропии с ограничениями типа "корреляционного согласования" [3]. Если для отсчетов в направлениях $\theta_k = \varphi_k$ коэффициенты автокорреляции считаем известными и равными $V_k(\varphi_k)$, то для отсчетов в других направлениях коэффициенты автокорреляции $V_m(\theta_m)$ определяются априорными характеристиками внутренних шумов каждого из N датчиков. Пусть спектральная плотность шума k -го датчика равна N_k . Тогда спектральная плотность мощности $|g_{\theta m_p}(n_r, \varphi_k)|^2$ последовательности может быть выражена через обозначенные коэффициенты как

$$|g_{\theta m_p}(n_r, \varphi_k)|^2 = \begin{cases} \sum_{k=-N}^N V_k(\varphi_k) \exp \left(-j2\pi \frac{kn_r}{N} \right) + \sum_{\substack{m=-M \\ m \neq k}}^M V_m(\theta_m) \exp \left(-j2\pi \frac{mn_r}{N} \right) & M = kN. \\ 0, & m > M, \quad m < -M; \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку внутренние шумы приемников в задаче пространственной обработки интерпретируются как пространственные δ -коррелированные шумы, а в периодограмме $g(n_r, \varphi_k) = \{g_{\theta 1p}, g_{\theta 2p}, \dots, g_{\theta mp}\}$, $n_r = \text{const}$, отсчеты в направлениях $\theta_m \neq \varphi_k$ должны представлять собой отсчеты δ -коррелированного случайного процесса. При этом условии результирующая последовательность (т.е. последовательность, в которую включены отсчеты сигнала с коэффициентами автокорреляции $V_k(\varphi_k)$) будет последовательностью с максимальной энтропией.

Таким образом, выражение для оценки изображения (2) со взвешиванием по θ примет следующий вид:

$$\hat{g}(n_r, \varphi_k) = \sum_{k=-N}^N g_{\theta m_p}(n_r, \varphi_k) \exp \left[-j2\pi \frac{m_0 n_r}{kN} \cos(\theta_m - \varphi_k) \right] U(m_0) \exp \left[-j2\pi \Phi(m) \right], \quad (4)$$

где

$$U(m_0) = \begin{cases} [V_k(\varphi_k)]^{1/2}, & \theta_m = \varphi_k; \\ [V_m(\theta_m)]^{1/2}, & \theta_m \neq \varphi_k; \end{cases} \quad (5)$$

$\xi_m = [V_m(\theta_m)]^{1/2}$ – релеевские случайные числа с параметрами распределения, определяемыми характеристиками внутреннего шума датчика, для которого вычисляется оценка;

$\Phi(m)$ – равномерно в диапазоне $\{-\pi, \pi\}$ распределенные случайные числа. Как ξ_m , так и $\Phi(m)$ являются независимыми числами.

Если на входы датчиков системы обнаружения-измерения, помимо акустического шума поступают помеховые сигналы со одинаковыми по знаку или знакопередающимися коэффициентами пространственной корреляции, они, соответственно, образуют (на интервале наблюдения) монотонную или знакопередающуюся по θ последовательность. В обоих случаях последовательности являются пространственно коррелированными. При умножении данной последовательности на последовательность весовых коэффициентов вида (5) результирующие значения становятся псевдослучайными, и пространственная корреляция мешающих сигналов разрушается. Имеет место эффект выбеливания пространственно-коррелированного шума, благодаря чему, очевидно, уменьшается влияние артефактов, вызванных регулярностью структуры последовательности мешающих сигналов.

В соответствии с условиями преобразования пространственных координат (9) $\theta_m = \theta_{nm} - \theta_{дат}$, где $\theta_{дат}$ – угловое направление приемного датчика.

Запишем окончательное выражение для алгоритма томографической обработки в системе приемных датчиков методом регуляризованных обратных проекций на основе свертки со взвешиванием.

1. Подалгоритм обработки в i -м датчике.

а) Получение выборки (проекции) $g_i(x_k, y_k)$ в системе координат, связанной с i -м датчиком: $r_k = (x_k^2 + y_k^2)^{1/2}$; $\varphi_k = \arctg(y_k/x_k)$.

б) Вычисление сечения пространственного спектра под углом $\theta_k = \varphi_k$ как преобразование Радона проекции под углом φ_k : $G_i(\rho_k, \theta_k) = \mathfrak{R}_r \{g_i(r_k, \varphi_k)\}$.

в) Умножение вычисленного изображения на весовую функцию: $U(\rho_k) = \mathfrak{R}_r \{k(r_k)\}$.

г) Вычисление оценки псевдоизображения облучаемой области в i -м датчике как обратного преобразования Радона-Стилтьеса оценки сечения пространственного спектра $\hat{G}_k(\rho_k, \theta_k) = G_i(\rho_k, \theta_k)U(\rho_k)$:

$$\hat{g}_i(r_k, \theta_k) = \mathfrak{R}_\rho^{-1} \{ \hat{G}_i(r_k, \theta_k) \}. \quad (6)$$

2. Подалгоритм совместной обработки данных всех датчиков системы

а) Умножение оценок (6) на весовые функции $U_i(\theta_k)$, описываемые выражениями (5):

$$\hat{g}_w(r_k, \theta_k) = g_i(r_k, \theta_k)U_i(\theta_k).$$

б) Вычисление интегральной оценки псевдоизображения анализируемой области как набора обратных преобразований Радона оценок $\hat{g}_w(r_k, \theta_k)$ по всем дискретным значениям θ_k при различных значениях параметра r_k : $g(r_k, \varphi_k) = \mathfrak{R}_\theta^{-1} \{ \hat{g}_w(r_k, \theta_k) \}$.

в) При необходимости выполняется обратный пересчет координат: $x_k = r_k \cos \varphi_k$; $y_k = r_k \sin \varphi_k$.

Схема устройства совместной обработки сигналов в системе датчиков обнаружения акустического шума изображена на рис. 1.

Таким образом, в каждом датчике выполняется два (прямое и обратное) преобразования Радона. В устройстве совместной обработки сигналов от N датчиков выполняется N обратных преобразований Радона. При дискретизации этих преобразований аргументы $r_k, \varphi_k, \rho_k, \theta_k$ заменяются соответственно на аргументы $n_r, n_\varphi, m_\rho, m_\theta$.

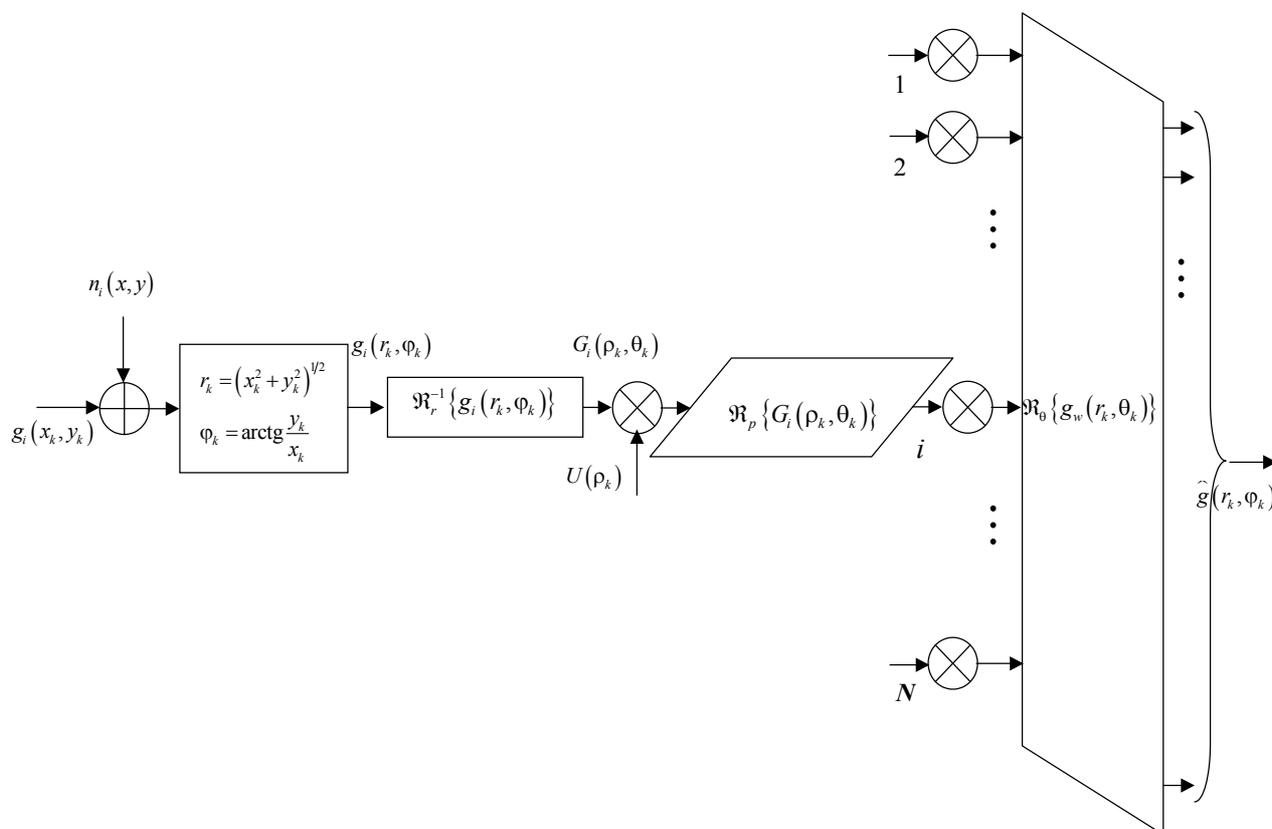


Рис. 1 Схема устройства совместной обработки сигналов в системе датчиков обнаружения акустического шума

IV. Выводы

1. Для разработки практически реализуемых алгоритмов томографической обработки выполнен анализ пространственно-временных спектров (спектров пространственных частот) акустических шумов в системе, состоящей из нескольких приемников. Учитывая характер этого спектра, соответствующим образом модифицированы традиционные алгоритмы компьютерной томографии.

2. Модификация метода обнаружения источников акустического шума заключается в выборе и применении специальной весовой функции преобразования Радона методами обратных проекций на основе свертки. Основными требованиями к весовой функции являются "гладкость" формы, необходимая для снижения уровня пульсаций Гиббса. Гладкость формы также способствует снижению чувствительности вычислительного алгоритма к неполноте и зашумлению исходных данных.

3. Облик и конфигурацию системы (число датчиков-приемников, число и варианты размещения устройств совместной обработки, требования к быстродействию системы) планируется рассмотреть при проведении дальнейших исследований. Здесь отметим только, что при современном уровне развития универсальных и специализированных вычислителей (в частности, процессоров быстрых спектральных преобразований, программируемых

логических интегральных схем и программируемых логических матриц) наиболее просто можно реализовать алгоритмы многопозиционной компьютерной томографии.

Литература

1. Bulakovska Anna. Computerized acoustic system of detection and localization cracks in pipelines. СПТЕЛ-2013 (30 жовтня - 2 листопада 2013 р., м. Львів). – 4 РР.
2. Булаковская А.А. Алгоритм многопозиционного обнаружения источника акустического шума по смещенному сегменту пространственного спектра / А.А. Булаковская // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – № 5(39). – С. 98 - 102.
3. Виноградов Н.А. Применение принципов реконструктивной вычислительной томографии в МП РЛС и синтез алгоритмов цифровой обработки информации / Н.А. Виноградов // Тезисы доклада VI всесоюзной конференции "Голография-90", 18-20 сентября 1990 г. – Витебск. – С. 24-25.
4. Beran M.J. Theory of partial coherence / M.J. Beran, G.B. Parrent. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1964. – 193 РР.
5. Хелгасон С. Преобразование Радона / С. Хелгасон. – Москва : Мир, 1983. – 152 с.
6. Пономаренко О.В. Комп'ютеризована система виявлення свищів у продуктопроводах. Дис. ... канд. техн. наук. – Київ: НАУ, 2011. – 114 с.
7. Belkin G. Discrete Radon Transform / G. Belkin // IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing. – February 1987. – Vol. ASSP-35. – No. 2. – РР. 162-172.
8. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннел. – Москва : Мир, 1989. – 336 с.
9. Виноградов Н.А. Справочник по устройствам цифровой обработки информации / Н.А. Виноградов, В.Н. Яковлев, В.В. Воскресенский и др.; под ред. В.Н. Яковлева. – Київ : Техніка, 1988. – 415 с.
10. Тихонов А.Н. Математические задачи компьютерной томографии / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин, А.А. Тимонов. – Москва : Наука, 1987. – 160 с.
11. Рисс Ф. Лекции по функциональному анализу / Ф. Рисс, Б. Сёкефальви-Надь ; пер. с франц. – Москва : Мир, 1979. – 587 с.
12. Марпл-мл. С.П. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.П. Марпл-мл. – Москва : Мир, 1990. – 584 с.

Автор статті

Булаковська Анна Олександрівна – завідувач лабораторії аналізу та обробки інформації, Київський коледж зв'язку, Київ. Тел. +380 (67) 985 21 90. E-mail: ryhz@yandex.ua

Author of the article

Bulakovska Anna Oleksandrivna – head of laboratory of analysis and treatment of information, Kiev college of communication, Kyiv. Tel. +380 (67) 985 21 90. E-mail: ryhz@yandex.ua

Дата надходження в редакцію: 27.02.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М.А. Виноградов