

УДК 621.371:550.837.6

## ОЦЕНКА ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД ПЛАЗМОПОДОБНОГО ТИПА

Д.В. ГОЛОЛОБОВ, С.А. ЗАВАДСКИЙ, В.Б. КИРИЛЬЧУК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 11 марта 2011

Приведены результаты анализа частотных характеристик модулей коэффициента отражения электромагнитной волны с различными поляризациями от анизотропной среды плазмopodobного типа. Представлены зависимости оценочных параметров частотных характеристик модуля коэффициента отражения при вариациях концентраций частиц и относительной диэлектрической проницаемости наполнителя анизотропной среды, которые могут быть использованы для создания новых и уточнения существующих алгоритмов их обнаружения и идентификации.

*Ключевые слова:* электромагнитная волна, анизотропная среда, модуль коэффициента отражения, концентрация заряженных частиц, оценочный параметр.

### Введение. Постановка задачи

Анизотропные среды плазмopodobного типа образуются в результате специфических процессов, которые возникают на различных объектах искусственного и естественного происхождения [1]. В реальном канале радиосвязи неоднородности такого вида могут стать причиной существенного искажения электромагнитного поля, сопровождаемого потерей информации.

Приближенный алгоритм оценки искажений спектрального состава, отраженного от анизотропной среды сигнала, приведен в работе [2] и сводится к оценке комплексного коэффициента отражения в частотной области при известной спектральной характеристике воздействующей волны. Задачей настоящей работы является анализ трансформации частотной характеристики коэффициентов отражения волн с различными поляризациями при вариациях электродинамических параметров подстилающей анизотропной среды.

Пусть электромагнитная волна (ЭМВ) с круговой (в общем случае) поляризацией и напряженностью электрического поля  $E_{\Pi}$  падает на поверхность, разделяющую два полупространства, характеризуемые своими электродинамическими параметрами: верхнее –  $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  и нижнее, обладающее анизотропными свойствами –  $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$  (рис. 1). Волна падает на границу раздела под произвольным углом  $\theta_n$ , отсчитываемым от внешней нормали, совпадающей с осью OZ. Отраженная ЭМВ характеризуется напряженностью электрического поля  $E_0$  с углом отражения  $\theta_0$ . Вектор поля подмагничивания  $H_0$  лежит в плоскости XOZ и ориентирован перпендикулярно границе раздела двух сред. Электродинамическая модель анизотропной среды плазмopodobного типа (АСПТ) образована потоком заряженных частиц, находящимся в плотном диэлектрическом наполнителе и слабом поле подмагничивания. Модель АСПТ является многопараметрической, поскольку ее электродинамические характеристики определяются параметрами потока частиц, диэлектрического наполнителя и вектора магнитного поля [1].

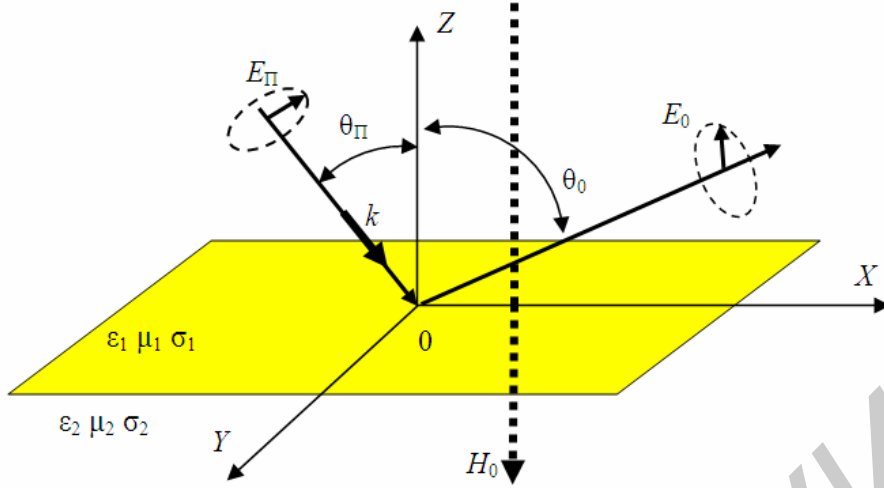


Рис. 1. Воздействие ЭМВ с произвольной поляризацией на АСПТ

### Коэффициенты Френеля волн, отраженных от АСПТ

Оценка отражательных свойств подстилающей поверхности при известных электродинамических параметрах среды и угле падения волны осуществляется по коэффициентам Френеля. В отличие от однородной подстилающей поверхности частотные зависимости имеют ярко выраженный резонансный характер [2].

При воздействии на АСПТ с заданными электродинамическими параметрами гармонической ЭМВ с линейной поляризацией под произвольным углом  $\theta_{\Pi}$  коэффициенты Френеля определяются выражениями:

- для вертикальной:

$$\dot{R}_B = \frac{u_1 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} - 1)}{u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)} = R_B \exp \varphi_B, \quad (1)$$

- для горизонтальной:

$$\dot{R}_G = \frac{u_4 \cos \theta_{\Pi} - u_2 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)}{(u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1))(1 + u_1)} = R_G \exp j\varphi_G, \quad (2)$$

где  $u_{1,2} = \sqrt{\varepsilon_R \varepsilon_L} \pm 1$ ,  $u_3 = \sqrt{\varepsilon_R} + \sqrt{\varepsilon_L}$ ,  $u_4 = \varepsilon_R + \varepsilon_R \varepsilon_L + \varepsilon_L$ ,  $\dot{\varepsilon}_R = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2$ ,  $\dot{\varepsilon}_L = \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2$ , а  $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2$  – компоненты тензора диэлектрической проницаемости, описывающего АСПТ. При этом появляется кроссполаризационная компонента поля, связанная с преобразованием поляризационной структуры воздействующей ЭМВ:

$$\dot{R}_{BG} = \dot{R}_{GB} = \frac{2(u_2 - 1)u_3 \cos \theta_{\Pi}}{u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)} = R_{BG} \exp j\varphi_{BG}. \quad (3)$$

Для волн с правым П или левым Л направлением вращения вектора электрической напряженности поля коэффициент отражения определяется выражениями

$$\dot{R}_{\Pi} = \frac{(1 + u_1)[u_1 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} - 1)] + u_4 \cos \theta_{\Pi} - u_2 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)}{2(u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1))(1 + u_1)} = R_{\Pi} \exp j\varphi_{\Pi}, \quad (4)$$

$$\dot{R}_{\text{Л}} = \frac{(1 + u_1)[u_1 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} - 1)] - u_4 \cos \theta_{\Pi} - u_2 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)}{2(u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1))(1 + u_1)} = R_{\text{Л}} \exp j\varphi_{\text{Л}}. \quad (5)$$

При этом компоненты тензора диэлектрической проницаемости являются зависимыми от параметров потока частиц с равными концентрациями электронов и ионов  $N_e = N_u = N$ , пронизывающим плотный диэлектрический наполнитель с комплексной диэлектрической проницаемостью, характеризуемой  $\epsilon_r$  и  $\sigma_r$  [1].

В качестве оценочных параметров частотных характеристик выбраны экстремальные значения модулей коэффициента отражения  $R_{\xi 0}$  и соответствующие им частоты  $f_0$  при вариациях электродинамических параметров потока частиц и наполнителя. Обозначенные особенности позволяют определить искажения, которые претерпит спектр зондирующего сигнала, а значит и его форма при отражении от границы АСПТ. В параметры принимаемого отраженного сигнала будет заложена информация о коэффициенте отражения, который в свою очередь связан с параметрами специфической среды.

### Численные исследования коэффициентов отражения при воздействии ЭМВ с линейной поляризацией

Результаты численных исследований частотных зависимостей коэффициентов отражения при различных значениях концентраций и диэлектрических проницаемостей для фиксированного угла падения  $\theta_{\Pi} = 60^\circ$  вертикально поляризованной ЭМВ приведены на рис. 2. Ранее было показано [3], что при использовании ЭМВ с вертикальной поляризацией и различных углов ее падения относительно нормали к границе раздела сред наблюдается максимальное поглощение при  $\theta_{\Pi} = 60^\circ$ .

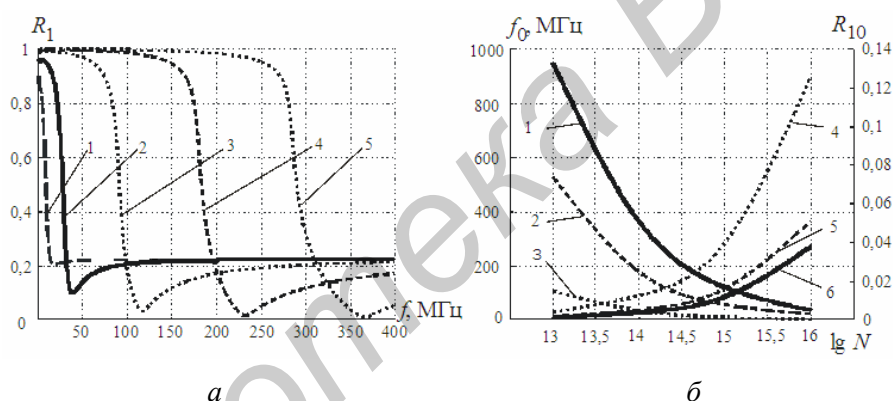


Рис. 2. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ вертикальной поляризации (а) и ее оценочных параметров (б) при вариации концентраций частиц

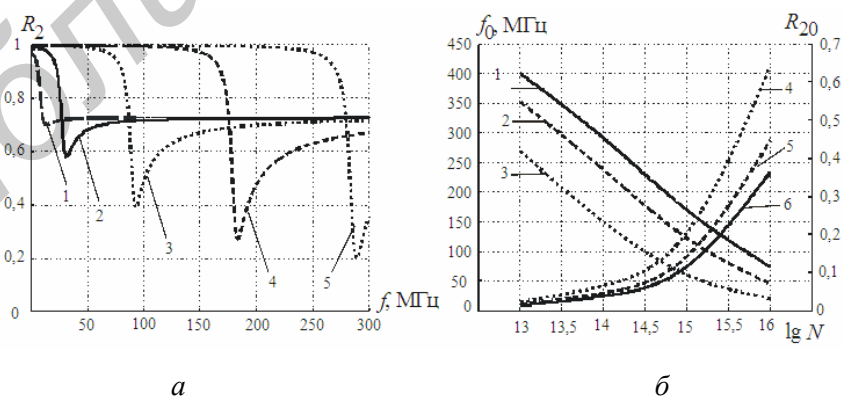


Рис. 3. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ горизонтальной поляризации (а) и ее оценочных параметров (б) при вариации концентраций частиц

Цифрами на рисунке обозначены кривые: а – частотные зависимости при 1 –  $N=10^{13} \text{ м}^{-3}$ ; 2 –  $N=10^{14} \text{ м}^{-3}$ ; 3 –  $N=5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$ ; 4 –  $N=10^{15} \text{ м}^{-3}$ ; 5 –  $N=10^{16} \text{ м}^{-3}$ ; б – оценочные параметры при 1 –  $R_{\xi 0}(\lg N)$  при  $\epsilon_r=15$ ; 2 –  $R_{\xi 0}(\lg N)$  при  $\epsilon_r=10$ ; 3 –  $R_{\xi 0}(\lg N)$  при  $\epsilon_r=5$ ; 4 –  $f_0(\lg N)$  при  $\epsilon_r=5$ ; 5 –  $f_0(\lg N)$  при  $\epsilon_r=10$ ; 6 –  $f_0(\lg N)$  при  $\epsilon_r=15$ . При вертикальной поляризации значение модуля коэффициента

отражения не превышает 0,4 при малых диэлектрических проницаемостях  $\epsilon_r$ , а частота достигает 950 МГц при больших  $\epsilon_r$ . С увеличением концентрации частиц происходит уменьшение экстремального значения модуля коэффициента отражения. При линейном росте концентрации  $R_{10}$  уменьшается экспоненциально. Причем с линейным уменьшением диэлектрической проницаемости наполнителя происходит линейное уменьшение экстремума частотной характеристики при фиксированной концентрации, а также сужение контраста (диапазона изменений)  $R_{10}$  при увеличении  $N$  (рис. 2,б). Если при  $N=10^{13}\text{м}^{-3}$  для относительной проницаемости 15 экстремум коэффициента отражения имеет значение 0,13, а для 5 – 0,01, то при  $N=10^{16}\text{м}^{-3}$  для тех же проницаемостей равен 0,008.

Для горизонтальной поляризации ЭМВ (рис. 3) тенденция уменьшения экстремума частотной характеристики сохраняется, однако это уменьшение происходит линейно. При фиксированной концентрации минимум  $R_{20}$  существенно больше в сравнении с оценочным параметром для вертикальной поляризации волны  $R_{10}$ . Объясняется это менее эффективным взаимодействием электрической компоненты поля, обусловленным влиянием пространственного взаимодействия магнитной составляющей поля волны и поля подмагничивания. При возрастании проницаемости наполнителя изменение  $R_{20}$ , когда концентрация частиц остается неизменной, является нелинейным. Так, если при  $N=10^{13}\text{м}^{-3}$ ,  $R_{20} = 0,63$  для  $\epsilon_r = 15$ , а для  $\epsilon_r = 5$  уже 0,41 (рис. 3,б), то для  $N=10^{16}\text{м}^{-3}$  для этих же проницаемостей экстремальное значение коэффициента отражения составляет 0,1 и 0,05. Линейное увеличение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  приводит к росту частоты  $f_0$ . Для горизонтальной поляризации максимальное значение модуля составляет 0,63 при малых  $\epsilon_r$ , частота  $f_{0\text{max}}=400$  МГц при больших  $\epsilon_r$ .

Пиковое значение кроссполяризационной компоненты отражения ЭМВ (рис. 4) является незначительным, однако ее можно использовать как специфический элемент идентификации, когда идет речь о необходимости регистрации сверхмалой информации. Численные исследования показывают, что проявление кроссполяризации волны однозначно связано с экстремумами  $R_{10}$  и  $R_{20}$ . Это обусловлено перетоком незначительной части энергии в ортогональную плоскость поляризации за счет взаимодействия с АСПТ. Частотная зависимость  $R(f)$  имеет резонансный характер при изменениях концентраций (рис. 4,а) с большими проницаемостями наполнителя. При малых  $\epsilon_r$  характеристика является нерезонансной. Вместе с тем, контраст (диапазон изменений)  $R_{30}$  (рис. 4,б) при росте и концентраций и проницаемости возрастает. При росте проницаемости наполнителя изменение  $R_{30}$  и  $f_0$ , когда концентрация частиц постоянна, является нелинейным.

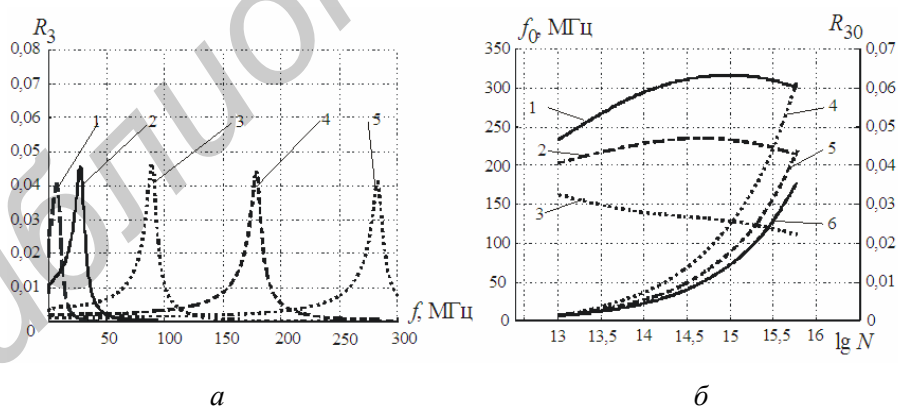


Рис. 4. Трансформация частотной характеристики модуля кроссполяризационной компоненты коэффициента отражения ЭМВ (а) и ее оценочных параметров (б) при вариации концентраций частиц

### Численные исследования коэффициентов отражения при воздействии ЭМВ с круговой поляризацией

Частотные характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ с круговой поляризацией для тех же параметров концентраций частиц и относительных диэлектрических проницаемостей наполнителя АСПТ приведены на рис. 5–6,а. Цифрами на рисунке обозначены кривые: а – частотные зависимости при 1 –  $N=10^{13}\text{м}^{-3}$ ; 2 –  $N=10^{14}\text{м}^{-3}$ ; 3 –  $N=5 \cdot 10^{14}\text{м}^{-3}$ ; 4 –

$N=10^{15} \text{ м}^{-3}$ ; 5 –  $N=5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ ; б – оценочные параметры при 1 –  $R_{\xi 0}(\lg N)$  при  $\epsilon_r=15$ ; 2 –  $R_{\xi 0}(\lg N)$  при  $\epsilon_r=10$ ; 3 –  $R_{\xi 0}(\lg N)$  при  $\epsilon_r=5$ ; 4 –  $f_0(\lg N)$  при  $\epsilon_r=5$ ; 5 –  $f_0(\lg N)$  при  $\epsilon_r=10$ ; 6 –  $f_0(\lg N)$  при  $\epsilon_r=15$ .

Сравнение зависимостей экстремумов частотных характеристик  $R_{40}$  и  $R_{50}$  от концентраций частиц и проницаемостей (рис. 5–6, б) с рассмотренными выше аналогичными зависимостями показывают следующее. Закономерность смещения частоты  $f_0$  при вариациях  $N$  и  $\epsilon_r$  для левополяризованной волны не отличается от закономерности для кроссполяризационной составляющей поля при зондировании АСПТ волной с линейной поляризацией. Отличие при таком воздействии на АСПТ составляют лишь значения экстремумов коэффициентов отражения, которые изменяются в диапазоне 0,27...0,55 для интервалов варьируемых электродинамических параметров. На полученных графиках можно наблюдать возрастание значений обоих оценочных параметров с увеличением концентрации электронов, а также незначительное влияние диэлектрической проницаемости на их поведение (рис. 5, б). Такое поведение характерно лишь для левой поляризации волны.

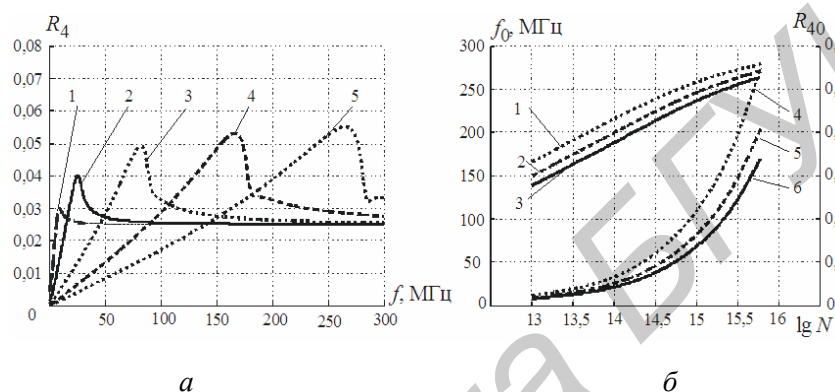


Рис. 5. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ левой поляризации (а) и ее оценочных параметров (б) при вариации концентраций частиц

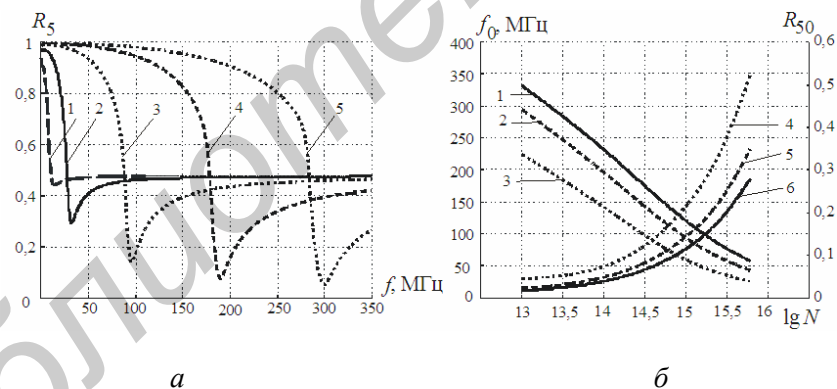


Рис. 6. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ правой поляризации (а) и ее оценочных параметров (б) при вариации концентраций частиц

Закономерность изменений  $R_{50}$  при вариациях  $N$  и  $\epsilon_r$  для правополяризованной волны не отличается от закономерности при зондировании АСПТ волной с горизонтальной поляризацией. Отличие при таком воздействии на АСПТ составляют лишь значения экстремумов коэффициентов отражения, которые лежат в пределах 0,35...0,45 для концентрации  $N=10^{13} \text{ м}^{-3}$ . При  $N=10^{16} \text{ м}^{-3}$  модуль  $R_{50}$  равен 0,05...0,1 и не отличается от модуля  $R_{20}$

### Результаты и их обсуждение

Анализ оценочных параметров частотных зависимостей коэффициентов отражения при дискретном изменении концентраций электронов и диэлектрической проницаемости наполнителя свидетельствует о следующем.

Установлены закономерности влияния вида поляризации, диэлектрической проницаемости и концентрации заряженных частиц на частотные смещения минимума коэффициента

отражения ЭМВ, а также его численных значений при вариации концентраций и относительной диэлектрической проницаемости наполнителя АСПТ. Дополнительная низкоэнергетическая кроссполаризационная составляющая электромагнитного поля, возникающая за счет двойного лучепреломления, создает характерную для анизотропного объекта с конечными электродинамическими параметрами информацию. Данную информацию можно оценить через соответствующие коэффициенты Френеля.

Результаты численных исследований позволяют проводить косвенные оценки трансформаций спектров зондирующих сигналов и являются данными для возможной идентификации свойств анизотропного образования.

При практической реализации радиотехнических систем поиска анизотропных объектов безусловным преимуществом обладают системы, построенные по многоканальному принципу, использующему поляризационную обработку в круговом поляризационном базисе. Для повышения уровня достоверности идентификации анизотропных объектов необходимо создавать дополнительный (вспомогательный) канал, обеспечивающий обработку сверхмалой информации, формируемой малыми электромагнитными полями.

## THE ESTIMATION OF REFLECTION CHARACTERISTICS OF PLASMA LIKE ANISOTROPIC MEDIA

D.V. GOLOLOBOV, S.A. ZAVADSKI, V.B. KIRILCHUK

### Abstract

Results of frequency response analysis of the reflection coefficient module of an electromagnetic wave at different polarizations from plasma like anisotropic media is given. The dependences of frequency response of the reflection coefficient module of an electromagnetic wave when charged particles concentration and filling permittivity are varied are shown here. They can be used for founding new methods and improvement of existing methods of anisotropic media detection and identification.

### Литература

1. Гололобов Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. Минск, 2009.
2. Гололобов Д.В., Качан И.А., Кунашко К.В. // Докл. БГУИР. 2010. №3(49). С. 5–11.
3. Гололобов Д.В. // Радиоэлектроника интеллектуальных транспортных систем. 2010. С. 88–99.