

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ГРУППИРОВКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМ АБОНЕНТСКОГО РАДИОДОСТУПА

Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО

Рассмотрена модель динамики неравновесных состояний при анализе электромагнитных взаимодействий в группировке радиоэлектронных средств систем абонентского радиодоступа. Показано, что с помощью нелинейной системы, моделирующей динамику взаимодействий группировки радиоэлектронных средств, можно прогнозировать состояние системы в будущем. Данная модель может быть использована при планировании, проектировании, частотно-территориальном планировании и эксплуатации систем абонентского радиодоступа.

The model of nonbalanced condition dynamics when analyzing electromagnetic interactions in a group of radio-electronic means of the user's radio access systems. It is shown that it is possible to predict the condition of the system in the future with the help of a nonlinear system modelling the dynamics of interactions of the group of radioelectronic means. The given model can be used in planning, designing, frequency-space planning and operation of the user's radio access systems.

ВВЕДЕНИЕ

Системы абонентского радиодоступа (САРД) получили в последнее время очень широкое распространение. Это вызвано невысокой стоимостью оборудования, возможностью быстро развернуть небольшую сеть, а также тем, что большинство систем работают в ISM (Industrial, Science, Medicine) диапазонах. Всемирной административной радиоконференцией диапазоны частот 2400–2483,5 МГц и 5725–5875 МГц отведены для использования высокочастотными установками, предназначенными для промышленных, научных и медицинских целей. Официально безлицензионное использование ISM-диапазона широкополосными средствами связи было разрешено в США в 1986 г., в Западной Европе — в начале 1990-х гг. При этом предельная мощность передатчика не должна превышать 100 мВт. Благодаря этому факту, а также технологическим достижениям, за последний годы производство оборудования для ISM-диапазона только одного из стандартов, Wi-Fi, выросло неимоверно и достигло миллионов экземпляров, а чипсеты (вернее, пока — приемопередающие устройства) по умолчанию стали встраиваться в отдельные модели ноутбуков. При этом, как правило, используется MiniPCI-плата расширения, устанавливаемая в ноутбук производителем (или дилером); встроенная антенна совмещается либо с LCD-монитором, либо с динамиками.

Все это упростило использование широкополосных средств связи в корпоративных сетях как внутри зданий, так и на территории университетских городков, больших госпиталей, промышленных объектов, торговых центров, складов, железнодорожных станций, морских портов и т. п. Как правило, эти сети не мешают друг другу, так как имеют небольшую зону покрытия и находятся на несмежных территориях.

С другой стороны, операторы сетей не спешат использовать широкополосные средства в ISM-диапазонах именно по причине их безлицензионности. Ведь пока коммерческий оператор, который должен обеспечить качественную связь, не гарантирован от того, что рядом не появится еще один передатчик, который будет создавать помехи. Таким образом, для операторов связи необходим аппарат, позволяющий производить оценку электромагнитной совместимости (ЭМС) при воздействии одной сети САРД на другую или нескольких сетей САРД на одну, оценку ЭМС при воздействии сетей САРД на радиоэлектронные средства (РЕС) других радиослужб, оценку ЭМС при воздействии РЕС других служб на сети САРД, а также прогнозировать тенденцию по потреблению радиочастотного ресурса данными системами.

Целью данной работы как раз и является использование математической модели состояния электромагнитных взаимодействий в динамике [1] при наличии нескольких сетей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим модель динамики неравновесных состояний при анализе электромагнитных взаимодействий в группировке радиоэлектронных средств систем абонентского радиодоступа.

В группировке РЭС САРД основные параметры самих средств $x(t)$ обычно известны, детерминированы. Макросостояние же всей группировки — случайно. Это объясняется влиянием множества неопределенных, случайных условий, формируемых характеристиками распространения радиоволн (РРВ). В результате случайных взаимодействий $y_j(t)$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, где n — число РЭС, в самих параметрах РЭС

происходят изменения. В группировке РЭС имеются соответствующие динамические взаимодействия, которые проявляются в результате измерений и наблюдений и характеризуются вектором $\vec{y}(t)$. Динамика изменений параметров описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = F(t)\vec{x}(t) + B(t)\vec{u}(t) + G(t)\vec{n}(t), \quad (1)$$

где $\vec{x}(t)$ — вектор состояний, $F(t)$ — матрица состояния, $\vec{u}(t)$ — вектор управления, $B(t)$ — матрица управления, $\vec{n}(t)$ — случайные возмущения, $G(t)$ — матрица случайных входных возмущений. Или в более общем случае

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = k\Phi[\vec{x}(t), Y^*(t)], \quad (2)$$

где $k = \text{diag}(k_i, i \in \overline{1, n})$, если x_i независимы, или матрица $K[n \times n]$ при наличии их зависимости.

Успешность решения задачи электромагнитной совместимости рассматриваемой группировки зависит от наличных ресурсов $g_k = g_k(\vec{x}(t), t)$, $k \in \overline{1, r}$, а также от известных априорных вероятностей $a_{ij} = a_{ij}(\vec{x}(t), t)$; $i, j \in \overline{1, n}$ и параметров c_{ijk} , определяющих характеристики данной связи между РЭС, которые от $x(t)$ не зависят.

Кроме того, сами наблюдения $\vec{y}(t)$ становятся зависимы от состояния. Поэтому, уравнение (2) можно представить в виде

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)].$$

Наличные ресурсы g_k определяются суммой частотно-территориальных, временных, поляризационных, энергетических и других параметров РЭС и линий связи. Их можно представить в виде:

$$g_k(\vec{x}(t), t) = \sum_{i, j=1}^n c_{ijk} y_{ij}, \quad (3)$$

$$y_{ij} \geq 0, k \in \overline{1, r}, i, j \in \overline{1, n}.$$

В системе группировки РЭС в процессе ее функционирования реализуется соответствующее перераспределение ресурсов $Y^*(t)$, определяемое моделями стационарных состояний, которые описываются задачами максимизации выражения [2, 3]

$$H(Y) = \sum_{i, j=1}^n y_{ij} \ln \frac{a_{ij}}{y_{ij}} + y_{ij} \rightarrow \max \quad (4)$$

при соответствующих ограничениях на ресурсы.

Динамика состояния распределительного процесса определяется решением $Y^*(t)$ задачи (2), которое, как следует из (3) и (4), зависит от ее параметров a_{ij} , c_{ijk} и g_k .

Таким образом, модель динамики неравновесных состояний (МНС) САРД приобретает следующий вид:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)];$$

$$Y^*(\vec{x}(t), t) = \arg \max \left[H(Y) \left| \sum_{i, j=1}^n c_{ijk} y_{ij} = g_k(\vec{x}(t), t) \right. \right],$$

$$\text{где } H(Y) = \sum_{i, j=1}^n y_{ij} \ln \frac{a_{ij}}{y_{ij}} + y_{ij}.$$

Рассмотрим структурную схему макросистемы, образованную группировкой РЭС (рис. 1). Электромагнитные взаимодействия $y_{ij}(t)$ происходят между элементами $x_i(t)$ и $x_j(t)$, соответственно — источниками и рецепторами.

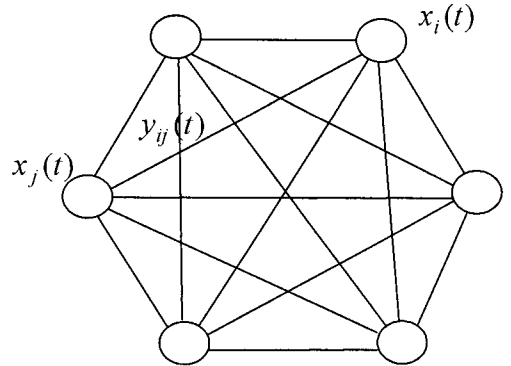


Рис. 1. Структурная схема взаимодействий y_{ij} в САРД

Взаимодействующие связи между элементами определяются матрицами $C_k = [c_{ijk}; i, j \in \overline{1, n}]$, которые состоят из 0 и 1 и определяют наличие или отсутствие такой связи. Элементы вектора $Y^*(t)$ в общем случае представляют собой комплексные величины, и они определяют амплитуду и фазу имеющих место взаимодействий.

Очевидно, в такой неравновесной системе отмечаются два основных процесса (потока): восстановления и распределения. Такой процесс мы наблюдаем в системах абонентского радиодоступа, когда абонентские терминалы (АТ) потребляют и освобождают ресурс точек доступа (ТД), т. е. происходит распределение и восстановление ресурса САРД.

Обозначим через $\Phi[\vec{x}(t), Y(t)]$ поток восстановления и через $Q[\vec{x}(t), Y(t)]$ поток распределения. Эти потоки зависят от состояния $\vec{x}(t)$ — процесса восстановления и состояния $\vec{Y}(t)$ — процесса распределения.

В рамках предположений о том, что время восстановления намного больше времени распределения [2],

можно записать следующую, в общем случае нелинейную, систему уравнений:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)], \quad (5)$$

$$\varepsilon \frac{dY(t)}{dt} = Q[\vec{x}(t), Y^*(\vec{x}(t), t)], \quad (6)$$

где ε — матрица малых параметров, определяющая интенсивность радиоэлектронных взаимодействий в рассматриваемой системе.

Из этих уравнений видно, что координаты $\vec{x}(t)$ изменяются существенно медленнее, чем $Y(t)$. Формирование модели вида (6) для распределительного процесса с ограничениями и разнотипными ресурсами пока остается нерешенной задачей [4,5]. Такую модель удалось построить лишь для тех случаев, когда динамика распределительного процесса — марковская, для ограничений балансового типа. В рассматриваемом случае можно предположить, что динамика распределительного процесса — марковская [3], поскольку не имеет значения, когда и как САРД перешла в текущее состояние, а существенно лишь то, какой ресурс система использует на данный момент времени — частотный, поляризационный, временной или пространственный.

Проанализируем динамику состояния группировки РЭС САРД. Для этого необходимо описать структуру ресурсов и их распределение между РЭС. Будем рассматривать группировку РЭС, состоящую из множества передатчиков и приемников. Все они являются потребителями ресурса. Если потребители ресурса состоят из n типов с численностью Y_i , то количество ресурса B является функцией численности типов $B = B(Y_1, \dots, Y_n)$. При отсутствии потребителей ($Y_1 = \dots = Y_n = 0$) имеем максимальный ресурс $B(0)$. При очень большом их количестве ($Y_i \rightarrow \infty, \dots, Y_n \rightarrow \infty$) ресурс стремится к нулю $B(\infty) = 0$. Использование нескольких сетей или достаточно большое число АТ одной сети на ограниченной площади (выставки, конференции, корпоративные, локальные сети и т. п.) ведет к ухудшению качества связи, сбоям, происходящим из-за «засорения» эфира. Скорость изменения численности РЭС i -го типа определяется появлением новых $k_i Y_i$ (коэффициенты k_i можно принять постоянными $k_i = \text{const}$) и исчезновением функционирующих $g_i Y_i$. Конкурентная борьба за ресурс влияет на процесс исчезновения РЭС из взаимодействия, т. е. коэффициенты g_i зависят от количества ресурса u_i , потребляемого в среднем одним РЭС, $g_i = g_{i0} - \mu_i u_i$; $g_{i0}, \mu_i > 0$.

Тогда

$$\frac{dY}{dt} = \varepsilon_i Y_i + \mu_i w_i, \quad i \in \overline{1, n}, \quad (7)$$

где $w_i = u_i Y_i$ — количество ресурса, потребляемого i -м типом РЭС; $\varepsilon_i = k_i - g_{i0}$.

Распределение ресурса B происходит существенно быстрее, чем его восстановление. Поэтому будем рассматривать стационарные состояния распределительного процесса при фиксированных на момент времени t численностях типов РЭС.

Механизм этого процесса можно представить следующим образом. Пусть ресурс потребляется порциями — поддиапазонами (участками) частот Δ . Тогда $B = m\Delta$, где m — количество каналов передачи. Можно предположить, что каналы передачи случайным образом и независимо друг от друга распределяются по всей группировке n типов РЭС так, что у каждого типа оказывается количество ресурса $w_i = \Delta m_i$.

Для этого распределительного процесса можно указать некоторую априорную характеристику. Для каждого типа РЭС обычно известно нормативное количество ресурса a_i . Определим величину

$$v_i = \frac{a_i Y_i}{\sum_{i=1}^n a_i Y_i}; \quad 0 \leq v_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (8)$$

Тогда процесс случайного распределения ресурса по типам РЭС эквивалентен случайному и независимому распределению m каналов по n типам РЭС с априорной вероятностью распределения $V = \{v_1, \dots, v_n\}$. Стационарное состояние такого процесса определяется моделью вида [3]

$$H(w) = \sum_{i=1}^n (w_i \ln \frac{v_i}{w_i} + w_i) \rightarrow \max$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = B(Y) \quad (9)$$

С учетом (8) получим

$$w_i^* = a_i Y_i \frac{B(Y)}{\sum_{i=1}^n a_i Y_i}$$

Подставим это выражение в (5):

$$\frac{dY}{dt} = Y_i (\varepsilon_i + \tilde{a}_i \varphi(Y)), \quad (10)$$

где $\varphi(Y) = \frac{B(Y)}{\sum_{i=1}^n a_i Y_i}$.

Учтем такие качественные свойства функции $B(Y)$, как ($B(0) \neq 0, B(\infty) \rightarrow 0$) и будем считать $B_{\max} = B(0)$. Из этого вытекает, что $\varphi(Y)$ будет монотонно убывать для $Y_i \geq 0$.

В этом случае коэффициенты ее линейной аппроксимации отрицательны, т. е.

$$\varphi(Y) \cong \varphi(\tilde{Y}) = \sum_{s=1}^n v_s (Y_s - \tilde{Y}_s), \quad (11)$$

где $v_s \geq 0, s \in \overline{1, n}, \tilde{Y} = \{\tilde{Y}_1, \dots, \tilde{Y}_n\}$ — фиксированные числа. Подставив (11) в (10), получим систему Воль-

терра, характеризующую динамику сосуществования группировки РЭС в условиях конкурентной борьбы за общий ресурс [6]:

$$\frac{dY}{dt} = Y_i(\epsilon_i - \sum_{s=1}^n v_s Y_s). \quad (12)$$

Если использовать для описания функции $\varphi(Y)$ квадратичную аппроксимацию, то получим нелинейную систему Вольтерра, учитывающую влияние непреднамеренных помех на состояние группировки РЭС:

$$\frac{dY}{dt} = Y_i(\epsilon_i - \sum_{s=1}^n v_s Y_s - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n v_{sj} Y_s Y_j). \quad (13)$$

Для моделирования динамики состояния взаимодействий в группировке РЭС на ЭВМ удобно перейти от системы (13) к ее рекуррентной записи:

$$Y_i(k+1) = Y_i(k) + Y_i(k) \left(\epsilon_i - \sum_{s=1}^n v_s Y_s(k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n v_{sj} Y_s(k) Y_j(k) \right), \quad (14)$$

где k – дискретное время, $i, j, s \in \overline{1, n}$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим динамику состояния двух сетей САРД при различных значениях ϵ , учитывающих интенсивность взаимодействия РЭС как одной сети на другую, так и саму на себя. Формализация данного показателя носит самостоятельный характер и решается в зависимости от решаемой задачи. В показатель интенсивности взаимодействия может входить рост численности РЭС, частотно-энергетический ресурс, потребляемый одним типом РЭС, адаптируемость сети к сигнально-помеховой обстановке и др., а определение данного показателя является задачей многокритериальной оптимизации

Предположим, что количество РЭС каждой сети на начальный момент составляет $a = 100$ ед., частотно-энергетический ресурс на начальный момент составляет: $y_1(k=0) = 0,0176$ – для первой сети и $y_2(k=0) = 0,0406$ – для второй сети, выраженных в относительных единицах. При этом, потребление ресурса одним РЭС согласно (8) составит $v_1 = 0,3024$; $v_2 = 0,6976$.

На рис. 2 показано перераспределение частотно-энергетического ресурса во времени при одинаковой интенсивности взаимодействия РЭС, а именно $\epsilon_1 = 0.1$; $\epsilon_2 = 0.1$. Номера кривых соответствуют номеру сети.

Как видно из графиков (рис. 2), при малых и одинаковых значениях ϵ зависимость перераспределения ресурса между РЭС двух сетей практически линейно возрастает во времени и при дальнейшем k -рост прекращается. Различие состоит лишь в начальном используемом ресурсе. Такая тенденция, очевидно, ха-

рактерна для сосуществования двух сетей при неантагонистическом характере их функционирования.

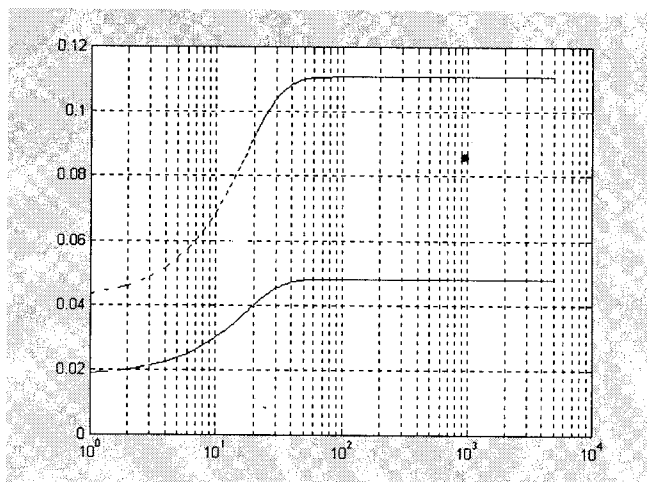


Рис. 2. Зависимость распределения ресурса при слабой интенсивности взаимодействий

При значениях $\epsilon_1 = 2,4$; $\epsilon_2 = 2,3$ (рис. 3) отмечаются три характерных области графиков. Начальная область, где отмечается плавное увеличение потребляемого ресурса как для одной сети, так и для другой. При этом для первой сети потребляемый ресурс увеличивается медленнее по сравнению со второй. Это объясняется тем, что ее потребляемый ресурс единицей РЭС меньше, и увеличение численности РЭС не на столько влияет на общий потребляемый ресурс. Вторая область – стационарная, равновесная часть. Далее наблюдается увеличение потребления ресурса первой сетью за счет большего показателя ϵ_1 по сравнению с ϵ_2 и спад потребления ресурса второй сетью вследствие подавления ее первой сетью. Также можно заметить, что при достижении первой сетью некоторого критического значения потребляемого ресурса данный показатель начинает снижаться, и устанавливается на определенных значениях. Данное явление объясняется тем, что при достижении критического количества РЭС происходит «засорение» эфира и подавление самой сети себя.

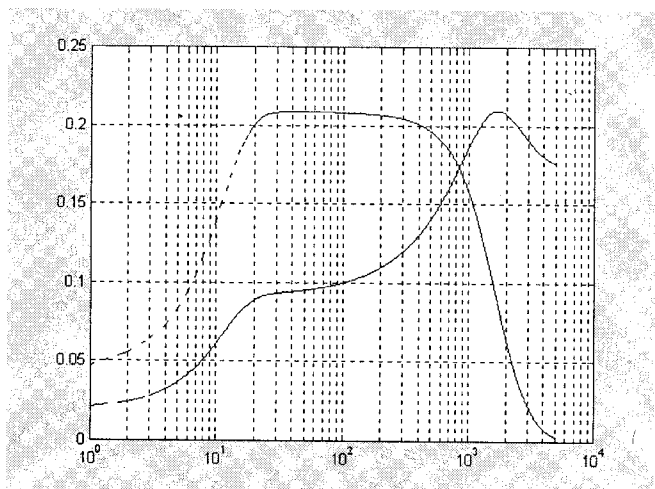


Рис. 3. Зависимость перераспределения ресурса от времени при докритической интенсивности взаимодействий

При значениях $\epsilon_1 = 1,6$; $\epsilon_2 = 1,6$; (рис. 4) отмечаются две области. Начальная область, с ростом увеличения потребляемого ресурса (переходной режим), затем наблюдаются скачкообразные изменения потребления ресурса, связанные с достижением критических значений по насыщению системы, с влиянием не только увеличения численности РЭС, но и ограничением наличного ресурса. Можно сказать, что система в данном случае имеет неустойчивый установившийся режим.

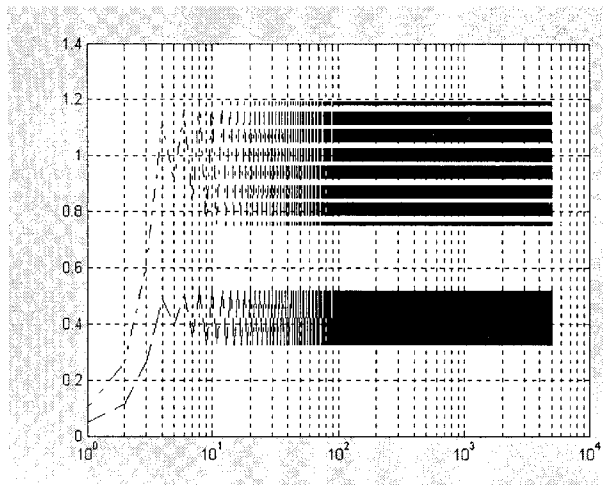


Рис. 4. Зависимость числа потребителей от времени в области критической интенсивности взаимодействий

Проанализирована также динамика взаимодействий группировки РЭС при значениях $\epsilon_1 = 2,004$; $\epsilon_2 = 2,003$ (рис. 5), при которых система приобретает запредельное насыщенное состояние. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при достаточно больших значениях параметра интенсивности взаимодействия РЭС динамика распределения ресурса становится непредсказуемой: может происходить как резкое увеличение взаимодействий, так и резкое снижение, характерное для тех ситуаций, которые возникают в САРД в ЧНН или, например, в местах скопления АТ. Также из приведенного рисунка видно подавление второй сети первой.

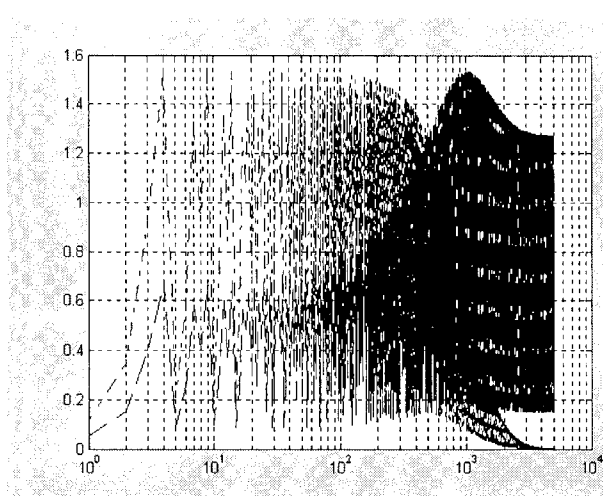


Рис. 5. Зависимость числа потребителей от времени в закритической области взаимодействий

Как видно из приведенных рисунков, перераспределение ресурсов в значительной мере зависит от параметра интенсивности взаимодействий РЭС. Проведен анализ и построена зависимость потребления ресурсов в установившемся режиме от параметра интенсивности ϵ (рис. 6) для одной сети.

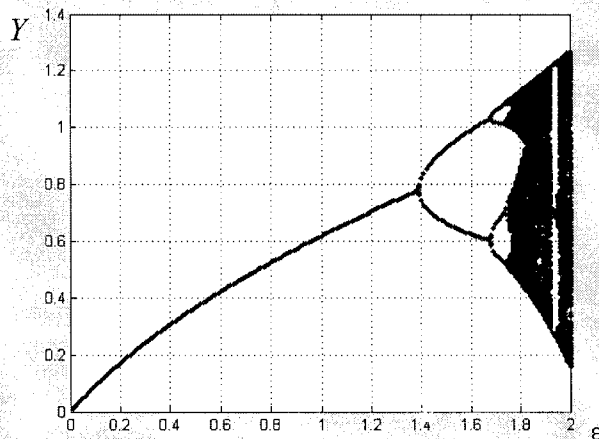


Рис. 6. Зависимость потребления ресурсов Y от интенсивности взаимодействий ϵ

Как видно из приведенного графика, критическим числом ϵ , при котором система еще не теряет устойчивости, является $\epsilon \approx 1,4$. Из графика (рис. 6) следует, что в области $\epsilon > 1,4$ наступают раздвоения траекторий (бифуркация состояния).

Очевидно, в области $\epsilon \geq 1,4$ изменения состояния наблюдаемой системы могут оказаться значительными и неоднозначными при незначительных входных воздействиях. Такое состояние в теории управления трактуется как неустойчивое [2, 5].

Устойчивость в данном случае понимается в классическом варианте: чтобы малые изменения управляющих параметров в области $\epsilon < 1,4$ не приводили к большим изменениям состояния системы.

Аналогичное неустойчивое поведение может наступить и в равновесной системе (1), когда при добавлении незначительного количества радиосредств в группировку РЭС такое равновесное состояние уже не наступает.

Близкие по состоянию неравновесные условия могут возникать и в других системах связи, с которыми взаимодействуют САРД. Так, попытка внедрения методов динамической маршрутизации привела к появлению проблемы «биения маршрутов»; в САРД, функционирующих по протоколу IEEE 802.11a, возникают «взрывы фрагментов», когда из-за нерационального выбора параметров система загружается повторными передачами фрагментов.

Изучение неравновесных состояний представляет значительный и самостоятельный интерес. В данной работе продемонстрирована методика его использования, имеющая, на наш взгляд, большое будущее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена модель динамики неравновесных состояний при анализе электромагнитных взаимодействий в группировке радиоэлектронных средств систем абонентского радиодоступа. На конкретном примере было показано, как с помощью нелинейной системы (14), моделирующей динамику взаимодействий группировки РЭС, можно анализировать ее состояние в будущем. Данная модель позволяет выполнять анализ при различных конкретных параметрах отдельных типов РЭС, их взаимодействий и распределения ресурсов. Данные исследования позволяют дать рекомендации при планировании, проектировании, частотно-территориальном планировании и эксплуатации сетей САРД.

Литература: 1. Олейник В.Ф. Динамика состояния электромагнитных взаимодействий в группировке РЭС// Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. Радиотехника. — № 128. — 2002. —

С. 100–105. 2. Мееров М.В. Исследование и оптимизация многосвязных систем управления. — М.: Наука, 1986. 3. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 367 с. 4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2-х книгах. — М.: Мир, 1984. 5. Уайт Д.Р.Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: Пер. с англ. В 3-х томах. — М.: Сов. Радио, 1977–1979. 6. Апорович А.Ф. Статистическая теория электромагнитной совместимости. — Минск: Наука и техника, 1984.



Поступила в редколлегию 08.04.2004

Коляденко Юлия Юрьевна, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем ХНУРЭ. Область научных интересов: пространственно-временная обработка сигналов, адаптивные антенные решетки, анализ и синтез нелинейных систем.