

УДК 621.396

В.В. Поповский¹, Г.В. Сокол²¹ Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харків² Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

ПРОАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Предлагается для решения задач N использовать децентрализованные, проактивные методы управления ресурсами в сложившейся мультиагентной группировке RES. С использованием разработанной модели когнитивного поведения в мультиагентной среде решена задача о равномерном (консенсуальном), линейном размещении точек на отрезке (на множестве ресурса). Дается анализ состояния модели при поиске консенсуального решения. Даны рекомендации по дальнейшему расширению решений на другие задачи телекоммуникаций.

Ключевые слова: мультиагентные сети, пиринговые сети, электромагнитная совместимость, телекоммуникационные сети, агенты.

Введение

На сегодняшний день имеется множество методов решения проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Несмотря на постоянный поиск и усовершенствования этих методов и все более расширяющийся объем используемых для этого физических ресурсов, данная проблема не будет до конца решенной, пока существует цивилизация. Иначе: все возрастающие потребности в использовании радиоэлектронных средств требует все более совершенных методов обеспечения ЭМС.

Исторически новыми, получившими наибольшее развитие для решения задачи, явились методы обеспечения ЭМС основанные на предварительном планировании радиочастотной обстановки путем назначения и распределения частот, взаимного удаления и пространственно-поляризационный разнос приемо-передатчиков с целью повторного использования частотного ресурса и др. [1]. В процессе эксплуатации, когда возникает конфликтная ситуация, связанная с нарушением внутрисистемной или межсистемной ЭМС, находят приемлемые методы дистанционирования, методы, основанные на изменении соотношений ресурсных параметров: перестраиваются на новые частоты, находят временной консенсус или меняют пространственное положение и поляризацию, применяют ряд других методов, направляемых на повышение развязки [1]. Все эти методы решения проблемы ЭМС носят реактивный характер, то есть исполняются как реакции на поступившее внешнее воздействие.

Вместе с тем, в наступившую эпоху развития управляемых, адаптивных и самоорганизующихся систем все большую популярность приобретают активные (проактивные) методы решения различных задач, в том числе задач ЭМС. К числу таких относятся задачи так называемого «когнитивного радио», когда за счет контроля эфира, находятся участки ра-

диочастотного спектра (РЧС) временно освобожденные от передачи информации. Временная работа на этих участках и представляет суть данного радио.

Такая активная стратегия при решении задач ЭМС может быть расширена и на другие ресурсы информационной системы, то есть на групповое использование ее ресурсов в динамике функционирования. Известно, что такие попытки предпринимались и реализовывались в виде централизованного управления в радиосети [1]. Однако эти решения не получили распространения, поскольку для контроля и управления нужно было создавать еще одну параллельную радиосеть, при этом терялся весь смысл такой борьбы за ЭМС.

Совсем иной эффект получается при использовании децентрализации методов решения задач ЭМС, когда каждая радиостанция (формация) решает задачу лишь со своим ближайшим окружением (другими формациями) в реальном масштабе времени. Децентрализованное распределенное управление формациями можно охарактеризовать как формирование геометрических образов в пространстве группой агентов при помощи локального обмена информацией [2, 3]. Широко известны и популярны файлообменные децентрализованные пиринговые P2P-сети, работающие через Интернет как оверлейные [4].

Локальность взаимодействия означает, что агент не имеет, либо не использует информацию о системе в целом и контактирует лишь с относительно узким кругом «соседей». Такой базовой децентрализованной является модель кооперативного поведения с достижением консенсуса между выходами агентов.

Многие системные практические задачи сводятся к нахождению условий консенсуса в сети агентов при которых разница между текущим значением состояния $x_i(t)$ и неким требуемым x^* достигает желаемого уровня.

Определение [2]: В сети достигается среднеквадратический консенсус (ϵ -консенсус) в момент

t_i , если $M\|x_i(t)\|^2 < \infty$, $i \in n$ и существует случайная величина x^* , что $M\|x_i(t) - x^*\|^2 \leq \varepsilon$, $\forall i \in n$.

Моделям коллективного поведения мультиагентных систем (МАС) и анализу их функционирования посвящено много работ [2,3]. Мы воспользуемся теоретическими результатами работ по МАС для нахождения консенсусного коллективного решения по обеспечению ЭМС в группировке радиоэлектронных средств.

Результаты исследований О нахождении консенсусных решений в мультиагентных сетях

Среди задач, решение которых можно свести к нахождению условий консенсуса в многоантенных системах можно указать на задачи синхронизации, достижения баланса состояний, управления мощностью абонентских терминалов в числе и решение задач электромагнитной совместимости и др. Задача о достижении консенсуса состоит в формировании протокола управления, обеспечивающего консенсусное решение. В условиях линейности это управление непосредственно зависит от оценки разницы j -х агентов и состояний i -го агента:

$$u_i(t) = D_{ij}(t) \hat{x}_i(t), \quad (1)$$

где $D_{ij}(t)$ - коэффициент, который определяет оптимальность переходного режима управления [5].

Условия ЭМС характеризуются уровнем взаимодействия состояний отдельных радиостанций, узлов, агентов и для конкретного i -го агента эти условия могут быть описаны в виде матрицы взаимодействий $A = (a_{ij})$, элементы a_{ij} которой определяют уровень воздействия агента j на агента i . В предположении того, что в группировке i -х агентов происходит процесс поиска более благоприятных соотношений состояний i -го агента во взаимодействии с j -агентами, данный процесс можно представить дифференциальным уравнением

$$dx_i(t)/dt = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Уравнение состояния (1) может быть представлено также в дискретном виде:

$$x_i(k+1) = x_i(k) - \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(k) - x_j(k)), \quad (3)$$

где k - номер шага дискретизации.

В матричной форме уравнение состояния системы агентов имеет вид:

$$dx(t)/dt = -Lx(t),$$

где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ - вектор состоя-

ний, L - лапласовская матрица модели агентов, определяемая равенством:

$$L = \text{diag}(A1) - A, \quad 1 = (1, 1, \dots, 1)^T.$$

Систему взаимодействующих агентов можно представить в виде сети, где матрица $A = (a_{ij})$ задает взвешенный граф зависимостей G с множеством вершин $V(G)$ и дуг $E(G)$ с весом $w_{ij} = a_{ij}$. В модели системы (2) направленность дуг ориентирована от зависимых агентов в направлении агента i .

Модель коллективного поведения

Под коллективным поведением агентов будем подразумевать взаимодействия приемо-передающих узлов телекоммуникационных сетей, а также соответствующие сетевые ресурсы, участвующие в формировании радиочастотной обстановки: несущие частоты мешающих передатчиков, параметры модулированных сигналов, их уровни, пространственно-поляризационные параметры и др., то есть те параметры, по которым приходится взаимодействовать отдельной i -й радиостанции с j -м коллективом станций, использующими общий ресурс. Предполагаем при этом, что x_i, x_j состояния всех взаимодействующих агентов в процессе функционирования изменяют номиналы своих параметров с конечной скоростью:

$$dx(t)/dt = V_x.$$

Задачи консенсуса (задачи сходимости состояний агентов к общему решению) полностью адекватна задачам по обеспечению ЭМС. В частности к такому типу относятся задачи равномерного расположения агентов на отрезке $f_k - f_n$, на плоскости $(x, y) \in S$ или в N -мерном пространстве. Так, на практике это решение приводит к рациональному занятию всеми передатчиками выделенного участка радиочастотного диапазона. В других случаях задача сводится к выбору числа позиций в многопозиционном сигнале i -й радиостанции, достаточном для заданного качества приема или к выбору уровней параметров передаваемых и принимаемых сигналов и др.

Очевидно, кроме равномерного распределения агентов на ограниченной шкале возможны и другие варианты: приоритетное расположение, с ограничением на интервале конечность интервалов и др. [2,3].

Задача о равномерном линейном размещении точек на отрезке

Децентрализация предполагает, что для принятия решения i -м агентом на отрезке (на оси частот) достаточно информации о расстояниях между двумя ближайшими соседями. В процессе решения задачи каждый из n -агентов движется в направлении середины отрезка, соединяющего его с ближайшими соседями, а крайние: первый и последний агенты, стремятся занять положение между границами отрезка и ближайшими к ним по номерам соседями.

Решение задачи:

Дано: $x(t)$ - координаты положения агента в i -й точке шкалы в момент $t \geq 0$, x_b, x_e - фиксированные координаты начала и конца отрезка шкалы соответственно, $dx_i(t)/dt = V_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ - скорость измерения координаты i -й точки агента.

Выбор закона управления [3]:

$$V_1 = (x_2 + x_6)/2 - x_1, \quad V_3 = (x_e - x_{n-1})/2 - x_n,$$

$$V_2 = (x_{i+1} + x_{i-1})/2 - x_i, \quad i = 2, 3, \dots, n - i.$$

Для линейной динамической системы уравнение динамики перемещения агента вдоль отрезка $x = x_b - x_e$ при поиске консенсусного решения представляется в виде

$$dx_i(t) / dt = Ax(t) + b,$$

где $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ - вектор состояния формаций агентов, $b = [0.5x_b, 0, \dots, 0.5x_e]$,

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0.5 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0.5 & -1 & & 0.5 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0.5 & -1 \end{bmatrix}, \quad A \in \mathbb{R}^{n \times n}.$$

Матрица A отрицательно определена при любых n , следовательно существует обратная A^{-1} система (4) положительно определенная. При этом система - устойчива.

Анализ состояния модели системы при поиске консенсусного решения

Собственные значения λ_k матрицы A равны:

$$\lambda_k = -2 \sin^2 \frac{k\pi}{2(n+2)}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Приведем систему (2) к одноранговому виду путем замены переменных $z = x - x^*$, где $x^* = -A^{-1}b$. В результате получаем:

$$dz(t) / dt = Az(t). \quad (5)$$

Очевидно $z(t)$ стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$, а x_i стремится к выражению $x_b + i(x_e - x_b) / (n - 1)$ при $t \rightarrow \infty$, $t = 1, 2, \dots, n$. Для (5) существует оценка

$$\|z(t)\| \leq e^{\lambda t} \|z(0)\|. \quad (6)$$

Отсюда с учетом замены переменных

$$\|x(t) - x^*\| \leq e^{\lambda t} \|x(0) - x^*\|$$

получаем оценки скорости сходимости алгоритма

$$\hat{\lambda} = \max_k \operatorname{Re} \lambda_k = 2 \sin^2 (\pi / (2(n - 1))). \quad (7)$$

При большом значении n справедлива приближенная оценка [3]:

$$\lambda = \pi^2 / 2n^2. \quad (8)$$

Итак, алгоритм сходится со скоростью обратно пропорциональный квадрату числа позиций на оси

отрезка. Продемонстрируем динамику сходимости алгоритма к установившемуся состоянию.

Пример. Пусть начальные положения 4-х точек расположен в координатах $x_{0i} = 4; 4.8; 5.2; 5.9$. Разместить их на отрезке $x = x_b - x_e = 4 - 1$. Траектории движения точек в процессе поиска консенсуса найдем из решения уравнений (4). Графические решения задачи представлены на рис. 1.

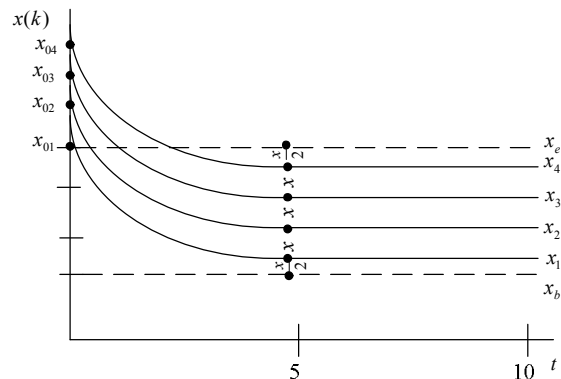


Рис. 1. Траектория движения 4-х точек x_i , $i = 1, 2, 3, 4$ внутри отрезка $x_e = 4$, $x_b = 1$

Согласно оценке $\|x(t) - x^*\| \leq e^{\lambda t} \|x(0) - x^*\|$ на интервале $t = 10$ ошибка оценки составила $\|x(10) - x^*\| = 0.016$. При отсутствии различных дестабилизирующих факторов $\delta \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Дальнейшие расширенные задачи поиска консенсуса

Выстраивание траекторий движения точек равноотстоящих друг относительно друга является частным решением установления консенсуса. Возможно, очевидно, и более расширенная постановка задачи, основанная на использовании поиска минимальности разницы состояний i и j агентов: $\tilde{x} = x_i - x_j$ с использованием управления вектором весовых коэффициентов системы (4). Очевидно, получить консенсусное решение за счет вектора $w_{ij} = a_{ij}$ применительно к уравнениям (2), (3) не удастся, ибо минимизировать разницу можно лишь за счет одного из слагаемых.

В соответствии с определением [2] для удовлетворения критерия $\min M \|x_i - x_j^*\|^2 < \epsilon$ найдем алгоритм, обеспечивающий нахождение x_j^* . Очевидно $x_j^* = x_j w_j$, где w_j - ВВК (вектор весовых коэффициентов) $\forall j \in n$. В результате получаем критерий:

$$\min M \|x_i - x_j^*\|^2 = \min M \|x_i - w_j\|^2 \quad (9)$$

и с учетом этого критерия задача консенсуса сводится к оценке значений ВВК, управляющих состоянием j -х агентов.

Для оценки ВВК w_j воспользуемся формальной схожестью уравнений (2), (3) с уравнениями стохастической аппроксимации [5]. При этом искомая оценка ВВК приобретает вид

$$\hat{w}(k+1) = \hat{w}(k) + \mu[x_i(k) - x_j(k)\hat{w}_j(k)]x_i(k), \quad (10)$$

где μ – шаговая постоянная, определяющая скорость сходимости к установившемуся состоянию.

Общий вид алгоритма (8) представлен на рис. 2.

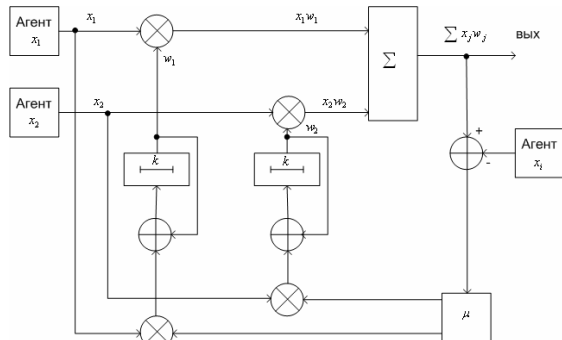


Рис.2. Структура алгоритма оценки ВВК при нахождении консенсуса для агента x_i

Заключение

1. Многие задачи телекоммуникаций могут быть решены с использованием модели мультиагентных систем. Такие модели хорошо согласовываются с решением задач о децентрализованном управлении, когда между разнородными частями системы (агентами) в результате взаимодействий, носящих локальный характер удается находить удовлетворяющее всех консенсусное решение. При этом агенты констатируют свое поведение лишь с ограниченным числом ближайших соседей.

2. К задаче нахождения консенсусного решения могут быть сведены многие задачи телекоммуникаций: синхронизации, баланса состояний, распределения ресурсов, нахождения равновесных состояний, в том числе и решения задач электромагнитной совместимости в беспроводных системах.

3. Наряду с традиционным методом решения задач, представляемых как задачи реагирования на появившиеся нарушения условий ЭМС, все более популярными становятся проактивные методы, основанные на поиске рациональных решений в текущей радиоэлектронной обстановке. Использование такого когнитивного динамического подхода позволяет значительно расширить объем ресурсов, пригодных для удачных решений.

4. Приведен пример решения задачи построения алгоритма равноудаленного расположения агентов на некотором физическом отрезке, где каждый агент стремится расположиться в средние между двумя ближайшими соседями. Приведены результаты математического моделирования и расчета траекторий переходного режима.

5. Представлено направление дальнейшего расширения адаптивного управления вектором весовых коэффициентов многоантенной системы, построенного на основе метода стохастической аппроксимации.

Список литературы

1. Управление радиочастотным спектром и ЭМС // Под ред. М.А.Быховского. М: Эхо-Трендз, 2006 – 233 с.
2. Чеботарев П.Ю., Агаев Р.П. Согласование характеристик в многоагентных системах и спектры лапласовских матриц орграфов. // А и Т, 2009, №3, с.136-151.
3. Квинто Я.И., Парсегов С.Э. Равноудаленное расположение агентов на отрезке: анализ алгоритма и его обобщение // АиТ, 2012, №11, с.30-41.
4. Москалец Н.В., Поповская Е.О. Модели одноранговых пиринговых сетей для передачи IPTV. Международный научно-исследовательский журнал. ISSN 2303-9868, №4(23), 2014. 4.2. стр. 46-50.
5. Popvskij V., Barkalov A., Titarenko L. Control and Adaptation in Telecommunication Systems. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg, 2011, 314 с.

Надійшла до редколегії 8.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л. Н. Беркман, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ПРОАКТИВНІ МЕТОДИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

В.В. Поповский, Г.В. Сокол

Пропонується для вирішення задач N використовувати децентралізовані, проактивні методи управління ресурсами в мультиагентному угрупованні RES. З використанням розробленої моделі когнітивної поведінки в мультиагентному середовищі, вирішена задача про рівномірне (консенсуальне), лінійне розміщення точок на відріжку (на множині ресурсу). Дається аналіз стану моделі при пошуку консенсуального рішення. Дані рекомендації щодо подальшого розширення рішень на інші задачі телекомунікацій.

Ключові слова: мультиагентні мережі, пірінгові мережі, електромагнітна сумісність, агенти.

PROACTIVE METHODS FOR SOLVING PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN WIRELESS TELECOMMUNICATION SYSTEMS

V.V. Popovskij, G.V. Sokol

The article discusses to solve tasks N with using decentralized, proactive methods of resource management in the existing multi-agent group RES. The problem of the uniform (consensual), linear placement of points on a segment (on the resource set) is solved in the multiagent environment using the developed model of solving cognitive behavior. The analysis of the state of the model in the search for a consensual solution is given. The recommendations for further expansion of solutions to other tasks of telecommunications are given.

Keywords: multiagent networks, peer networks, electromagnetic compatibility, agents.