

На правах рукописи



Данеев Роман Алексеевич

**РЕГРЕССИОННО-ТЕНЗОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СКРЫТОСТИ СРЕДСТВ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Улан-Удэ – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ИрГУПС).

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Сизых Виктор Николаевич

Официальные оппоненты:

Мартыянов Владимир Иванович –
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
кафедра «Автомобильные дороги», профессор
Шакиров Владислав Альбертович –
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», факультет энергетики
и автоматики, декан

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная
техническая академия», г. Ангарск

Защита состоится «23» декабря 2015 г., в 13 часов на заседании Диссертационного совета Д212.022.10 на базе ФГБОУ ВПО «Бурятский государственный университет» по адресу: 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Бурятский государственный университет» по адресу: г. Улан-Удэ, ул. Ранжурова, 4а, а также на сайте <http://www.bsu.ru/?mod=disser>.

Автореферат разослан «...» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Дармаев Тумэн Гомбоцыренович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном обществе вопросам защиты информации уделяется все большее внимание вследствие участившихся случаев несанкционированного доступа к центрам обработки данных и конфиденциальным каналам их передачи. Возрастает потребность в проведении испытаний средств вычислительной техники с целью выявления технических источников утечки защищаемых данных. Физическая утечка конфиденциальной информации от средств коммуникаций вычислительной техники может проходить по таким техническим каналам, как побочные электромагнитные излучения от объектов информатизации и линий связи, наводок сигнала на некриптофированной линии связи, цепи заземления и электропитания и т.п. Эти и близкие вопросы рассматривались в работах Белкина П.Ю., Беляева А.В., Девянина П.Н., Михальского О.О., Правикова Д.И., Першакова А.С., Платонова В.В., Тарасюка М.В., Щербакова А.Ю. и др.

Актуальность диссертационной работы обусловлена и тем, что обеспечение безопасности конфиденциальной информации – процесс по существу непрерывный, происходящий в условиях постоянно изменяющейся обстановки в сфере современных информационных технологий, появления все новых угроз нарушения конфиденциальности информации, а также новых усовершенствованных технических и программных средств, предназначенных для реализации этих угроз. Это вызывает необходимость исследования проблем по текущему контролю надежности систем защиты, поиска и разработки новых и эффективных математических методов и алгоритмов по защите цифровой информации с целью создания специализированного обеспечения.

В настоящей работе в качестве основного инструмента математического моделирования процесса обеспечения электромагнитной скрытности источников побочных излучений выступает регрессионный анализ, но в отличие от большинства современных постановок привлекается аппарат многомерной нелинейной регрессии, что, в конечном итоге, позволяет находить нетривиальные экстремальные решения. Представленные выше соображения указывают на высокую актуальность настоящей работы.

Объектом исследования является процесс обеспечения электромагнитной скрытности ПЭВМ и технических каналов передачи конфиденциальных данных.

Предмет исследования – методы анализа данных, вычислительные методы, средства разработки информационно-программных комплексов.

Целью работы являлась разработка модели, описывающей автоматизированный процесс обеспечения электромагнитной скрытности (ЭМ-скрытности) распределенных средств вычислительной техники для их защиты от утечки конфиденциальной информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные научно-прикладные задачи:

1. Разработать многомерную нелинейную регрессионно-тензорную модель, описывающую процесс измерения интенсивности источника электро-

магнитного излучения (ИЭМИ), проводимом в заданном комплексе точек сканирования сигнала.

2. Построить алгоритм параметрической идентификации регрессионно-тензорной модели, описывающей пеленгацию ИЭМИ в фиксированных точках несанкционированного сканирования.

3. Разработать алгоритмы автоматизированного поиска пространственно-углового положения ИЭМИ, основанные на минимизации интенсивности пеленгуемого сигнала ИЭМИ в потенциальном комплексе точек несанкционированного сканирования.

4. Получить оценки сходимости алгоритма оптимизации пространственного размещения ИЭМИ для обеспечения его ЭМ-скрытности в варианте трехвалентной регрессионно-тензорной модели функционирования ИЭМИ.

5. Создать программно-алгоритмический комплекс решения задачи идентификации векторно-матричной нелинейной многомерной регрессии оценки интенсивности сигнала ИЭМИ и оптимизации размещения ИЭМИ в заданной области с учетом минимальной пеленгации сигнала.

Методы исследования. Поставленные в диссертации задачи решались на основе применения методов линейной и тензорной алгебры, многомерного нелинейного регрессионного анализа, теории нелинейной оптимизации, автоматизированного проектирования и тестирования объектно-ориентированного распределенного и компонентного программирования.

Новизну работы составляют следующие результаты, выносимые на защиту:

1. Впервые предложен регрессионно-тензорный подход к моделированию процессов на основе обработки экспериментальных данных функционирования объектов произвольной природы.

2. Разработан новый помехозащищенный алгоритм параметрической идентификации трехвалентной регрессионно-тензорной модели с минимальной тензорной нормой, описывающей интенсивность поля ИЭМИ.

3. Сформированы двухвалентная и трехвалентная модели автоматизированного поиска пространственно-углового положения ИЭМИ.

4. Созданы оригинальные алгоритмическое, информационное и программное обеспечение процесса идентификации регрессионной модели интенсивности сигнала ИЭМИ и вычисления оптимальных координат его ориентации.

Достоверность результатов проведенных исследований обеспечивается корректным применением современных методов математического моделирования, применением аттестованных измерительных средств, совпадением значений прогнозной модели и экспериментальных данных до четвертого знака после запятой.

Практическая значимость работы. Применение разработанных в диссертации алгоритмов идентификации моделей, вычислительных схем оптимизации и программного комплекса позволяет повысить электромагнитную скрытность средств вычислительной техники и каналов передачи данных. Материалы диссертации используются в учебном процессе в Иркутском

государственном университете путей сообщения и Восточно-Сибирском институте МВД России.

Работа соответствует пунктам 2, 3 и 5 **паспорта** специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Международном форуме по проблемам науки, техники и образования (Москва, 2009 г.), V Международном симпозиуме «Обобщенные решения в проблемах управления» (Улан-Батор, 2009 г.), Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2011-2015 гг.), III Международной научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития» (Иркутск, 2012 г.), на научных семинарах в Иркутском государственном университете путей сообщения (Иркутск, 2011-2015 гг.), Иркутском национальном исследовательском техническом университете (Иркутск, 2014 г.), Сибирской академии права, экономики и управления (Иркутск, 2014-2015 гг.), Восточно-Сибирском институте МВД РФ (Иркутск, 2013-2014 гг.), Бурятском государственном университете (Улан-Удэ, 2015 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе пять статей в изданиях, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора заключается в постановке и реализации задач диссертационного исследования [1-4], формулировке положений научной новизны и практической значимости работы, разработке математического, алгоритмического обеспечения [5-12]. В работах с соавторами соискателю принадлежит от 30 до 75% результатов. Положения научной новизны, выносимые на защиту, принадлежат лично автору.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 185 наименований. Основной текст диссертации составляет 127 страниц, включает 6 таблиц и 23 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность и практическая значимость проводимых в диссертации исследований, описан объект исследования, дано краткое изложение основных разделов диссертации, представлена информация о внедрении и апробации работы.

В первой главе представлены аналитические материалы, касающиеся состояния современных научно-прикладных исследований по данной проблематике. Можно констатировать, что компьютеры настоящего поколения позволяют численно моделировать сложные нелинейные динамические процессы при условии, что для них существуют адекватные математические модели и алгоритмы. Так, решая проблему, связанную с уравнениями Максвелла (т.е. дифференциальными уравнениями в частных производных), мож-

но воспользоваться статистическими методами теории радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации.

Если в задачах статистического моделирования использовать регрессионный анализ, в развитие которого большой вклад внесли как иностранные (Хальд А., Рао С.Р., Химмельбау Д., Дрейпер Н.Р., Смит Г., Гутер Р.С., Себер Дж., Кади Дж., Афифи А., Эйзен С., Доугерти К., Мостеллер Ф., Тьюки Дж., Хьюбер П. и другие), так и отечественные ученые (Овчинский Б.В., Кобзарь А.И., Носков С.И., Айвазян С.А., Енуков И.С., Мешалкин Л.Д., Мхитарян В.С., Ивахненко А.Г., Орлов А.И., Демиденко Е.З., Дубровский С.А. и другие), то, наряду с «каноническими» линейными регрессиями, для повышения корректности моделей сложных нелинейных процессов следует применять многомерные нелинейные регрессии, выраженные на языке матриц и многовалентных ковариантных тензоров.

В данном контексте востребованы операторные модели, поскольку операторный формализм позволяет в рамках одной структуры рассматривать все виды систем – непрерывную/дискретную, линейную/нелинейную, сосредоточенную/распределенную. Модели данных систем, с одной стороны, поддаются тензорному формализму, допуская детальное аналитическое описание на базе аппарата сильной дифференцируемости векторных отображений и теории экстремальных задач, а с другой, играют важную роль в статистическом моделировании сложных электронных систем, в частности, обеспечивая (в рамках выбранного критерия) понижение энергетического уровня лепестков диаграммы направленности побочных электромагнитных наводок.

Во второй главе предложен универсальный способ многомерного нелинейного регрессионно-тензорного моделирования координат оптимальной пространственно-угловой ориентации источника электромагнитных излучений (в том числе ПЭВМ). Способ основан на представлении нелинейной регрессионной модели интенсивности излучения исследуемого ИЭМИ в виде суммы ковариантных тензоров фиксированной валентности и предъявляет минимальные требования к объему экспериментальных данных, необходимых для идентификации уравнений регрессионно модели и к количеству необходимых вычислений для определения оптимальных пространственных характеристик ИЭМИ.

Поскольку основными физическими факторами, влияющими на скрытность ИЭМИ, являются дифракция и интерференция его излучения, то в главе использование аппарата построения нелинейной регрессионно-тензорной модели направлено на численное решение задачи оптимизации пространственно-угловых координат ориентации ИЭМИ. Это позволяет обеспечивать расчет минимальной пеленгации сигнала ИЭМИ в заданном комплексе точек в условиях приемлемых объемов вычислений на базе современных ПЭВМ.

Введем некоторые обозначения. Пусть R – поле вещественных чисел, R^n – n -мерное векторное пространство над R с евклидовой нормой $\|\cdot\|_{R^n}$, $col(y_1, \dots, y_n) \in R^n$ – вектор-столбец, $M_{n,m}(R)$ – пространство всех $n \times m$ -матриц с элементами из поля R . Далее, через T_m^k обозначим пространство всех ковари-

антных тензоров k -ой валентности как вещественных полилинейных форм $f^{k,m} : R_1^m \times \dots \times R_k^m \rightarrow R$ с тензорной нормой $\|f^{k,m}\|_T = \left(\sum_{i \dots j} t_{i \dots j}^2 \right)^{1/2}$, где $t_{i \dots j}$ – ко-

эффициенты тензора $f^{k,m}$, значения которых заданы относительно стандартного ортонормированного базиса в евклидовом пространстве R^m .

Пусть $\zeta_i, 1 \leq i \leq n$ – некоторый фиксированный набор точек возможного несанкционированного зондирования электромагнитного поля ИЭМИ, $v \in R^m$ – вектор пространственно-угловой ориентации ИЭМИ с фиксированным начальном в точке $\omega \in R^m$, $w(\omega + v)$ – вектор выходных сигналов ИЭМИ – интенсивность электромагнитного сигнала от ИЭМИ в точках $\zeta_i, 1 \leq i \leq n$.

В качестве математической модели ИЭМИ рассмотрим нелинейную функциональную систему типа «вход–выход», задающую интенсивность сигнала ИЭМИ в точках несанкционированной пеленгации $\zeta_i, 1 \leq i \leq n$ и описываемую векторно-тензорным уравнением регрессии вида:

$$w(\omega + v) = \text{col} \left(\sum_{j=0}^k f_1^{j,m}(\zeta_1, \dots, v), \dots, \sum_{j=0}^k f_n^{j,m}(\zeta_n, \dots, v) \right) + \varepsilon(\omega, v), \quad (1)$$

где $w(\omega + v) \in R^n$, $v \in R^m$, $f_i^{j,m} \in T_m^j$, вектор-функция $\varepsilon(\omega, \cdot) : R^m \rightarrow R^n$ класса

$$\|\varepsilon(\omega, \cdot)\|_{R^n} = o \left((\nu_1^2 + \dots + \nu_m^2)^{k/2} \right), \quad \nu = \text{col}(\nu_1, \dots, \nu_m);$$

$f_i^{0,m}, 1 \leq i \leq n$ – инварианты, т.е. тензоры нулевой валентности (интенсивность электромагнитного поля в точках $\zeta_i, 1 \leq i \leq n$, индуцированного ИЭМИ с пространственно-угловой ориентацией $\omega \in R^m$).

Рассмотрим постановку задачи оптимальной пространственно-угловой ориентации ИЭМИ, обеспечивающей её ЭМ-скрытность:

(i) Для заданного аргумента $\omega \in R^m$ вектор-функции $w(\cdot) : \Omega \rightarrow R^n$ интенсивности сигнала ИЭМИ в точках $\zeta_i, 1 \leq i \leq n$, (где $\Omega \subset R^m$ – открытая окрестность точки ω) и фиксированного индекса k определить аналитические условия, при которых математическая модель ИЭМИ, выраженная через нелинейное отображение $w(\cdot)$, удовлетворяет регрессионной системе (1).

(ii) Построить алгоритм вычисления апостериорных оценок координат тензоров $f_i^{j,m}, 1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq 3$ на основе решения задачи оптимизации модели пеленгации сигнала ИЭМИ (параметрической идентификации многомерной нелинейной регрессионной системы (1)):

$$\begin{aligned} \min \left(\sum_{i=1}^q \left(\left\| w(\zeta_i, \cdot) - \text{col} \left(\sum_{j=0}^k f_1^{j,m}(\zeta_i, \dots, \nu), \dots, \sum_{j=0}^k f_n^{j,m}(\zeta_i, \dots, \nu) \right) \right\|_{R^n} \right)^2 \right)^{1/2}, \\ \min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^k \|f_i^{j,m}\|_T^2 \right)^{1/2}; \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $w_{(l)} \in R^n$ и $v_{(l)} \in R^m$, $1 \leq l \leq q$ – векторы экспериментальных данных (вектор $w_{(l)}$ – «реакция» в эксперименте l на «вариацию» $v_{(l)}$ относительно опорного вектора $\omega \in R^m$), q – число экспериментов (ограничения на величину q не накладываются, при этом допускаются эксперименты с одинаковыми $v_{(l)}$).

(iii) Для заданного (опорного) вектора пространственно-угловой ориентации ИЭМИ $\omega \in R^m$ и предположении, что $\varepsilon(\omega, \cdot) = 0$, построить процедуру вычисления оптимальных координат ИЭМИ как вектора $v^* \in R^m$ (вариация опорной ориентации ω), обеспечивающую минимальную взвешенно-осредненную интенсивность сигнала ИЭМИ в точках несанкционированного зондирования ζ_i , $1 \leq i \leq n$ при валентности регрессионной модели $k=3$:

$$\begin{aligned} \min F(v) & \in R^m, \\ F(v) &= \sum_{i=1}^n r_i w_i(v) + \nu, \end{aligned} \quad (3)$$

где координаты вектор-функции $\text{col}(w_1(\omega+v), \dots, w_n(\omega+v)) = w(\omega+v) \in R^n$ имеют аналитическое представление согласно идентифицированной в силу (2) регрессионной модели (1), $r_i > 0$ – весовые коэффициенты, отражающие «приоритет» между точками ζ_i , $1 \leq i \leq n$ зондирования сигнала ИЭМИ.

В главе 2 на базе формализации аналитических структур нелинейных векторных регрессий (1) исследованы свойства решений задач (i) – (iii). Следующее утверждение устанавливает важное аналитическое свойство (решение задачи (i)), которым должна обладать вектор-функция w , с целью прояснения вопроса: когда отображение w удовлетворяет понятию многомерной нелинейной тензорной регрессии класса (1).

Сформулируем утверждение 1, которое формулирует качественные условия для существования нелинейной регрессии (1) – тензорная модификация формулы Тейлора для векторных отображений.

Утверждение 1. Пусть Ω – открытая область в R^m , $w(\cdot)$ – отображение из Ω в R^n и ω – некоторая точка в Ω . Если существует производная $w^{(k)}$ порядка k , которая является равномерно непрерывной функцией от ω в Ω , то векторное отображение $w(\cdot): \Omega \rightarrow R^n$ удовлетворяет системе (1) с некоторыми тензорами $f_i^{j,m} \in T_m^j$, $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq k$.

В качестве уточнения регрессионной системы (1) рассмотрен случай валентности $k = 3$. В такой постановке уравнения (1) принимают вид:

$$\begin{aligned} w(\omega + v) &= c + A v + \\ &+ \text{col}(B_1 v + f_1^{3,m}(\omega, v), \dots, B_n v + f_n^{3,m}(\omega, v)) + \varepsilon(\omega, v), \\ \|\varepsilon(\omega, v)\|_{R^n} &= o((v_1^2 + \dots + v_m^2)^{3/2}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $c \in R^n$, $A \in M_{n,m}(R)$, $B_i \in M_{m,m}(R)$, $i=1, \dots, n$ – верхние треугольные матрицы, верхний индекс « T » здесь и далее означает операцию транспонирования векторов и матриц. В силу утверждения 1 для конструкций вида (4) имеем следующие аналитические представления

$$c = \text{col} \left(f_1^{0,m} \leftarrow, \dots, f_n^{0,m} \leftarrow \right) = w \leftarrow$$

$$A = w^{(1)} \leftarrow$$

$$\text{col} \left(\leftarrow B_1 + B_1^T \leftarrow, \dots, \leftarrow B_n + B_n^T \leftarrow \right) = w \leftarrow$$

Идентификация многосвязной нелинейной модели ИЭМИ (2) в классе нелинейных регрессий (4) в главе связана с понятием канонического решения по методу наименьших квадратов (МНК) для системы линейных алгебраических уравнений. В этих целях использована конструкция *нормального псевдорешения* системы уравнений $Dx = d$, $D \in M_{q,p}$, $d \in R^q$, когда его образует вектор $x \in R^p$, имеющий наименьшую норму $\|x\|_{R^p}$ среди всех векторов, доставляющих минимум $\|Dx - d\|_{R^q}$. Обозначим через E_q единичную $q \times q$ -матрицу. Далее, через D^+ обозначим псевдообратную матрицу для матрицы D . Асимптотическая конструкция матрицы D^+ имеет вид

$$D^+ = \lim B^T (QD^T + \tau E_q) : \tau \rightarrow 0 .$$

Условимся, что далее символ $\langle \cdot \rangle^+$ означает операцию псевдообращения соответствующей матрицы. В такой постановке вектор $x = D^+d$ представляет собой нормальное псевдорешение означенной выше системы; данная численная схема реализована при решении задачи (2).

В работе разработан **МНК-алгоритм**, решающий задачу параметрической идентификации (2) регрессионно-тензорной модели ИЭМИ в терминах уравнений

$$w_i \leftarrow c_i + \sum_{1 \leq j \leq m} a_{ij} v_j + \sum_{1 \leq g \leq h \leq m} b_{igh} v_g v_h + \sum_{1 \leq p \leq r \leq s \leq m} d_{iprs} v_p v_r v_s, \quad (i=1, \dots, n)$$

регрессионно-тензорной модели (4) имеет алгебраическое решение

$$z_i^* = U^+ \beta_i, \quad i=1,\dots,n,$$

$$z_i = \text{col}(a_i, a_{i1}, \dots, a_{in}, b_{i11}, \dots, b_{igh}, \dots, b_{inm}, d_{i11}, \dots, d_{iprs}, \dots, d_{inmm}),$$

$$1 \leq g \leq h \leq m, \quad 1 \leq p \leq r \leq s \leq m,$$

где

$$U = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \dots & \hat{\mathbf{C}}_q & \mathbf{C}_m \end{bmatrix}^T \in M_{q, \eta} \mid \sum_{i=1}^q \eta_i = 1 + m \left(q^2 + 2m + 3 \right) \right\},$$

$$\hat{\mathbf{C}}_q = \text{col} \left(\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_m \right) \mathbf{C}_1 \mathbf{C}_1^T, \mathbf{C}_2 \mathbf{C}_2^T, \dots, \mathbf{C}_m \mathbf{C}_m^T$$

$$\mathbf{C}_1 \mathbf{C}_1^T, \mathbf{C}_2 \mathbf{C}_2^T, \dots, \mathbf{C}_m \mathbf{C}_m^T \quad 1 \leq q \leq h \leq m, \quad 1 \leq p \leq r \leq s \leq m,$$

$$\text{col} \left(\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_m \right) = \mathbf{C}_q \in R^m, \quad 1 \leq l \leq q,$$

$$\beta_i = \text{col} \left(\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_m \right) \in R^q.$$

Оптимизация трилинейной формы (4) электромагнитного поля ИЭМИ в точках $\{\zeta_i\}_{1 \leq i \leq n}$ позволяет провести расчет оптимальных параметров безопасного режима функционирования ИЭМИ. Его основой является:

Утверждение 2. Пусть $B_i^* = (B_i + B_i^T) \in M_{m,m}(R)$, $1 \leq i \leq n$, где каждая B_i – матрица регрессионной системы (4). Тогда $v^* \in R^m$ – стационарная точка задачи оптимизации (3) имеет вид решения векторного уравнения:

$$\nu = \varphi \left(-B_1^* + \dots + r_n B_{nn}^* \right) + r_1 \partial f_1^{3,m} \left(\dots, \nu \right) \partial \nu + \dots + r_n \partial f_n^{3,m} \left(\dots, \nu \right) \partial \nu \quad (5)$$

Достаточным условием того, чтобы вектор ν^* обеспечивал для электромагнитного поля ИЭМИ в точках пеленгации $\{\zeta_i\}_{1 \leq i \leq n}$ качество его интенсивности вида (3) является следующее требование: стационарная точка (5), доставляющая минимум сигнала ИЭМИ в $\{\zeta_i\}_{1 \leq i \leq n}$, должна иметь специальный эллиптический тип, равносильный положению

$$\det [b_{ij}]_p > 0, \quad p=1, \dots, m, \quad (6)$$

где $[b_{ij}]_p \in M_{p,p}(R)$, $p=1, \dots, m$ – главные подматрицы матрицы

$$B^* = \left(r_1 \left(B_1^* + 2 \sum_{1 \leq g, p \leq m} \partial^2 f_1^{3,m} \left(\dots, \nu \right) \partial \nu_g \partial \nu_p \right) \right) + \dots + r_n \left(B_n^* + 2 \sum_{1 \leq g, p \leq m} \partial^2 f_n^{3,m} \left(\dots, \nu \right) \partial \nu_g \partial \nu_p \right) \in M_{m,m} \quad (6)$$

что эквивалентно требованию для собственных значений λ_p матрицы B^*

$$\lambda_p > 0, \quad p=1, \dots, m. \quad (7)$$

При $k=2$ гессиан $G(r)$ функционала $F(\nu)$ инвариантен к положению критической точки и равен

$$G(r) = r_1 B_1^* + \dots + r_n B_n^*,$$

при этом, если $\text{rank } G(r) = m$, то решение (5) единствено и равно

$$\nu^* = -G^{-1}(r) A^T r.$$

Для завершения анализа задачи (3) остается исследовать численное решение нелинейного алгебраического уравнения $\nu = \varphi(\nu)$. С этой целью в решении уравнения (5) в главе предложен алгоритмом *приближенного* нахождения этого решения по методу «последовательных приближений».

Пусть $\|\cdot\|_M$ – матричная норма в $M_{m,m}(R)$, согласованная [1, с. 181] с $\|\cdot\|_{R^m}$, $\bar{\Omega}$ – замкнутая выпуклая область в R^m , и пусть зафиксирован вектор $\nu_0 \in \bar{\Omega}$. Будем говорить, что $\varphi(\cdot): \bar{\Omega} \rightarrow \bar{\Omega}$ – *сжатие* в области $\bar{\Omega}$, если найдется число $0 < \alpha < 1$, для которого при всех $\nu \in \bar{\Omega}$ имеет место неравенство $\|\varphi^{(1)}(\nu)\|_M \leq \alpha$, где $\varphi^{(1)}(\nu)$ – производная (матрица-якобиан из пространства $M_{m,m}(R)$) функции φ в точке ν . В главе доказано

Утверждение 3. *Если $\nu \mapsto \varphi(\nu)$ – сжатие в области $\bar{\Omega}$, то существует единственный корень (решение) $\nu^* \in \bar{\Omega}$ уравнения $\nu = \varphi(\nu)$, который можно представить в виде*

$$\lim \{ \nu_i : \nu_{i+1} = \varphi(\nu_i), \nu_0 \in \bar{\Omega}, i=0, 1, \dots \},$$

при этом скорость сходимости последовательности $\{\nu_i\} \subset \bar{\Omega}$ к решению ν^* в этих условиях определяет неравенство

$$\|\nu^* - \nu_i\|_{R^m} \leq \alpha^i \|\nu_1 - \nu_0\|_{R^m} / (1 - \alpha), \quad i = 0, 1, \dots,$$

которое задает (при $i=0$) в пространстве R^m оценку области расположения корня ν^* :

¹ Ланкастер П. Теория матриц. – М.: Наука, 1982. 268 с.

$$\|v^* - v_0\|_{R^m} \leq \|v_1 - v_0\|_{R^m} / \alpha$$

Число итераций в процессе $\{v_i\}$, при которых

$$\|v^* - v_i\|_{R^m} \leq \delta = const > 0, \quad (8)$$

не превышает величину

$$\ln \left(\|v_1 - v_0\|_{R^m} / \delta \right) \leq \ln \left(\frac{\|v^* - v_0\|_{R^m}}{\delta} \right), \quad (9)$$

при этом номер «остановки» вычислительного процесса по критерию (8), заранее не больше (при округлении с «увеличением до целого») числа:

$$\ln \left(\|v_1 - v_0\|_{R^m} / \delta \right) \leq \ln \left(\frac{1}{\alpha} \right). \quad (10)$$

Поэтому можно заключить, что эвристический характер правила остановки итерационного процесса $\{v_i\}$, когда неизвестны ни истинное решение v^* , ни действительные границы области сжатия $\bar{\Omega}$, требует увеличения «с запасом» точности δ при выполнении условия (8). При этом ясно, что качественная оценка (9) поддается численному расчету, поскольку якобиан $\varphi^{(1)}(v_0)$ вычисляется согласно уравнению (5), тогда как условие (10) требует дополнительного определения α . Важно отметить, что (утверждение 3) геометрическая оценка области действия алгоритма

$$\|v^* - v_0\|_{R^m} \leq \|v_1 - v_0\|_{R^m} / (1 - \alpha),$$

как области, в которой лежит точка v^* , позволяет численно выявить все корни уравнения (5), являющиеся критическими точками функционала $F(\cdot)$ в W при «ф-сжатии». Кроме того:

– если при пары $(\bar{\Omega}, v_0)$ корень уравнения $v = \varphi(v)$ приводит, в отличие от (7), к положению $\lambda_p < 0$, $p=1, \dots, m$, то в точке v^* , исходя из задачи защиты излучения ИЭМИ, можно размещать датчик электромагнитных помех;

– если приведенный выше метод использования оператора сжатия не «работает» (например, при $\|\varphi^{(1)}(v_0)\|_M > 1$), то для численного решения уравнения (5) можно использовать метод Ньютона–Канторовича для уравнения

$$P(v) = 0, \quad P(v) := v - \varphi(v).$$

При этом в качестве начальной точки v_0 в итерационной схеме может выступать вектор, равный положению квазиоптимальной ориентации ИЭМИ

$$v_0 = -G^{-1}(r)A^T r,$$

которое в силу утверждения 1 представляет собой аналитическое решение задачи оптимального размещения ИЭМИ согласно критерию (3), когда в векторно-тензорном уравнении (1) регрессионное представление задано ковариантными тензорами валентности $k=2$.

В третьей главе для построения моделей нелинейной векторной регрессии оптимальной ориентации ИЭМИ автором разработан программный комплекс ОРИЭП (оптимальное размещение источника электромагнитного поля).

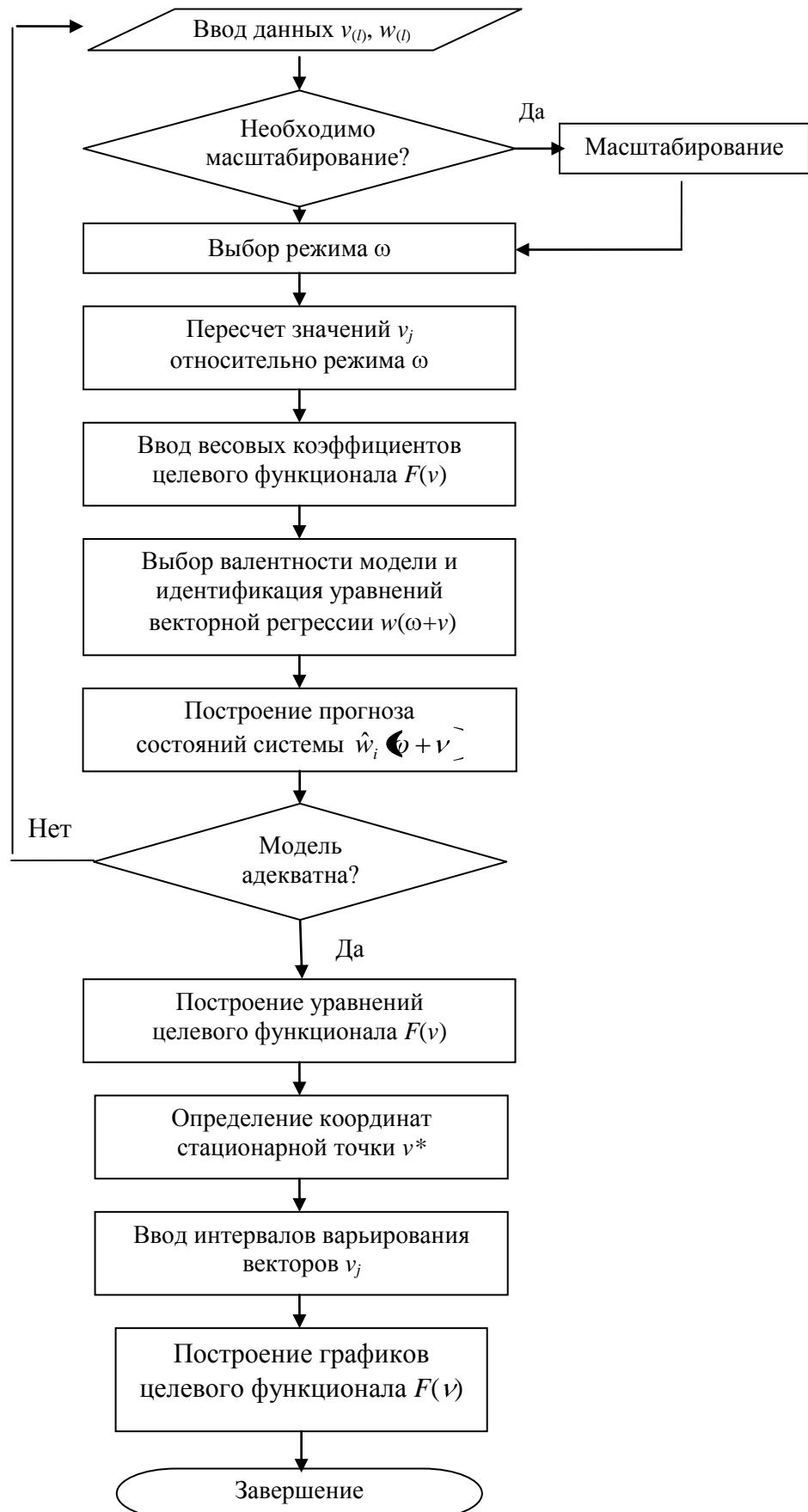


Рис.1. Алгоритм функционирования программного комплекса ОРИЭП

Алгоритм функционирования разработанного программного комплекса ОРИЭП представлен на рис. 1. Интерактивная работа пользователя с комплексом предусматривает следующие предварительные этапы:

- выбор m -координат размещения ИЭМИ n -точек сканирования;
- ввод значений $v_{(l)} \in R^m$ и показателей $w_{(l)} \in R^n$;
- выбор опорного режима ω , после чего все координаты вектора v рассматриваются как отклонения относительно опорной ориентации ω ;
- ввод весовых коэффициентов r_i целевого функционала $F(v)$.

На основе вычислительной схемы МНК-алгоритма и утверждения 2, описанных в главе 2, а также имитационного моделирования электростатического поля проведена верификация программной среды ОРИЭП посредством численного моделирования процесса, описывающего расчет оптимальных (согласно решения задачи оптимизации (3) при $n=4$, $m=2$, $q=5$) координат установки источника излучения поля (ИИП) внутри квадрата Q с угловыми точками (x_i, z_i) , $i=1, \dots, 4$ – рис. 2:

$$(x_1, z_1) = (0.0, 0.0), (x_2, z_2) = (0.0, 1.0), \\ (x_3, z_3) = (1.0, 1.0), (x_4, z_4) = (1.0, 0.0).$$

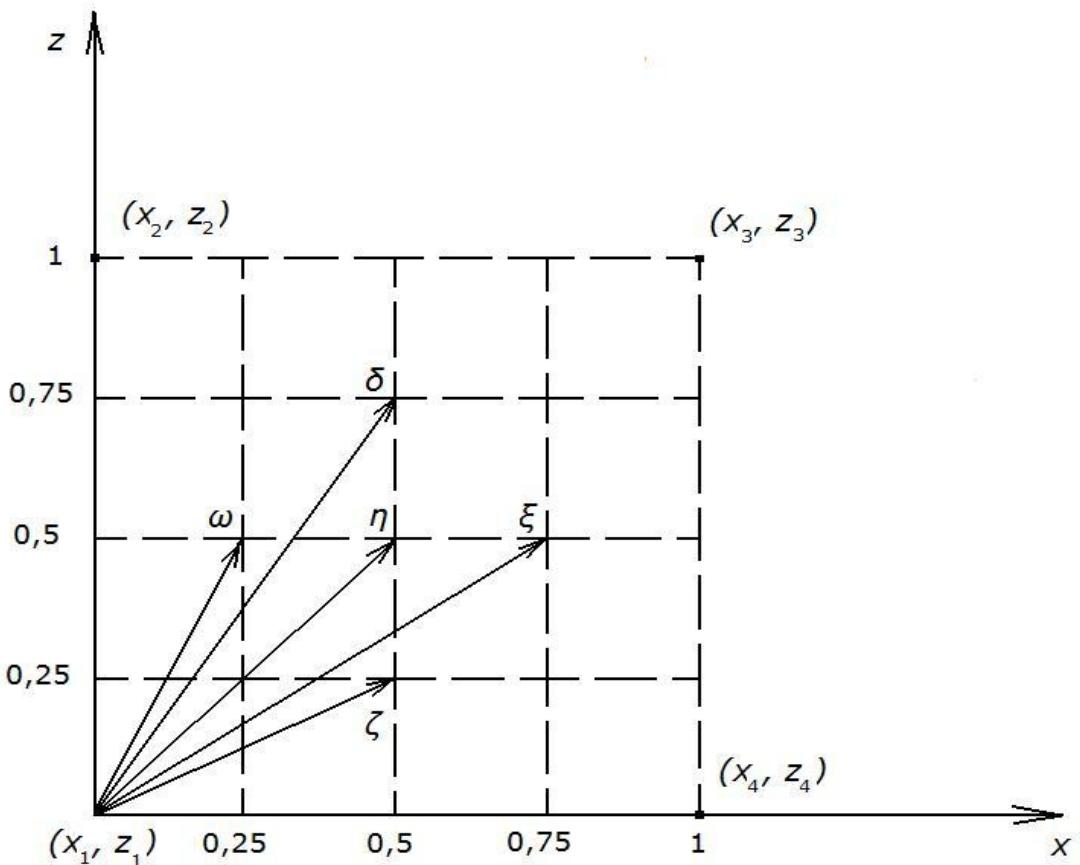


Рис. 2. Точки пеленгации (x_i, z_i) источника поля

В такой математической постановке в качестве опорного вектора ω (в уравнении многомерной регрессии (1)) из квадрата Q можно принять некоторый (рис. 2) эмпирически выделенный вектор из набора экспериментальных ориентаций ИИП – $\{\delta, \xi, \zeta, \eta, \omega\} \subset Q$. В этом случае в уравнении нелинейной

регрессии (1) вектор $v=col(v_1, v_2) \in R^2$ следует рассматривать как «вариацию» относительно опорного вектора $\omega \in Q$. Тогда:

«опорный вектор»: $\omega = (\omega_1, \omega_2) = (0.25, 0.5)$;

«входные данные»: $\delta, \xi, \zeta, \eta, \omega$;

«выходные данные»: $w = col(w_1, w_2, w_3, w_4)$,

где координаты вектора w – модули вектора напряженности электростатического поля в точках (x_i, z_i) , $i=1, \dots, 4$.

Данные эксперимента и результатов моделирования

Таблица 1

Номер эксперимента	Координаты источника поля		Модуль вектора напряженности электростатического поля в точках пеленгации (эксперимент)				Модуль вектора напряженности электростатического поля в точках пеленгации (модель)				
	№	x	z	w_1	w_2	w_3	w_4	\hat{w}_1	\hat{w}_2	\hat{w}_3	\hat{w}_4
1	0.50	0.75	1.2307	3.2	3.2	1.2307	1.2309	3.2001	3.2001	1.2309	1.2309
2	0.75	0.50	1.2307	1.2307	3.2	3.2	1.2309	1.2309	3.2001	3.2001	3.2001
3	0.50	0.25	3.2	1.2307	1.2307	3.2	3.2001	1.2309	1.2309	3.2001	3.2001
4	0.50	0.50	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5- ω	0.25	0.50	3.2	3.2	1.2307	1.2307	3.2	3.2	1.2308	1.2308	1.2308

В таблице 1 результаты численного эксперимента w_i получены в силу следующих аналитических соотношений (модуль вектора напряженности электростатического поля):

$$w_1(x, z) = (x^2 + z^2)^{-1}, \quad w_2(x, z) = (x^2 + (1-z)^2)^{-1}, \\ w_3(x, z) = ((1-x)^2 + (1-z)^2)^{-1}, \quad w_4(x, z) = ((1-x)^2 + z^2)^{-1},$$

где координаты (x, z) в таблице 1 соответствуют координатам «тестовых» векторов $\delta, \xi, \zeta, \eta, \omega \in Q$ (см. рис. 2):

$(x_\sigma, z_\sigma) = (0.5, 0.75)$ – первый эксперимент,

$(x_\xi, z_\xi) = (0.75, 0.5)$ – второй эксперимент,

$(x_\zeta, z_\zeta) = (0.5, 0.25)$ – третий эксперимент,

$(x_\eta, z_\eta) = (0.5, 0.5)$ – четвертый эксперимент,

$(x_\omega, z_\omega) = (0.25, 0.5)$ – пятый эксперимент.

Решение задачи идентификации (2) для векторного уравнения модели билинейно-тензорной регрессии (1), задающей апостериорную модель текущего состояния напряженности поля ИИП, приводит к системе:

$$\begin{aligned} \hat{w}_1(\omega+v) &= 3.2 - 5.661v_1 - 3.7067v_2 + 3.4464v_1^2 - 0.9267v_1v_2 + 3.4464v_2^2, \\ \hat{w}_2(\omega+v) &= 3.2 - 5.6616v_1 + 3.7067v_2 + 3.4464v_1^2 + 0.9267v_1v_2 + 3.4464v_2^2, \\ \hat{w}_3(\omega+v) &= 1.2308 + 2.2152v_1 + 3.7067v_2 + 3.4464v_1^2 + 0.9267v_1v_2 + 3.4464v_2^2, \\ \hat{w}_4(\omega+v) &= 1.2308 + 2.2152v_1 - 3.7067v_2 + 3.4464v_1^2 - 0.9267v_1v_2 + 3.4464v_2^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ прогнозной эффективности модели (11), можно основываться на сравнении колонок таблицы 1, здесь w_i – результат эксперимента, а \hat{w}_i – прогнозное значение согласно уравнениям (11).

Графическая иллюстрация изменений значения целевого функционала (3) в квадрате Q , определяемая задачей оптимизации

$$\min \left\{ F \left| \sum_{i=1}^4 \hat{w}_i \varphi_i + \nu \right| \omega + \nu \in Q \right\} \quad (12)$$

при варьировании ν относительно положения ω , приведена на рис. 3.

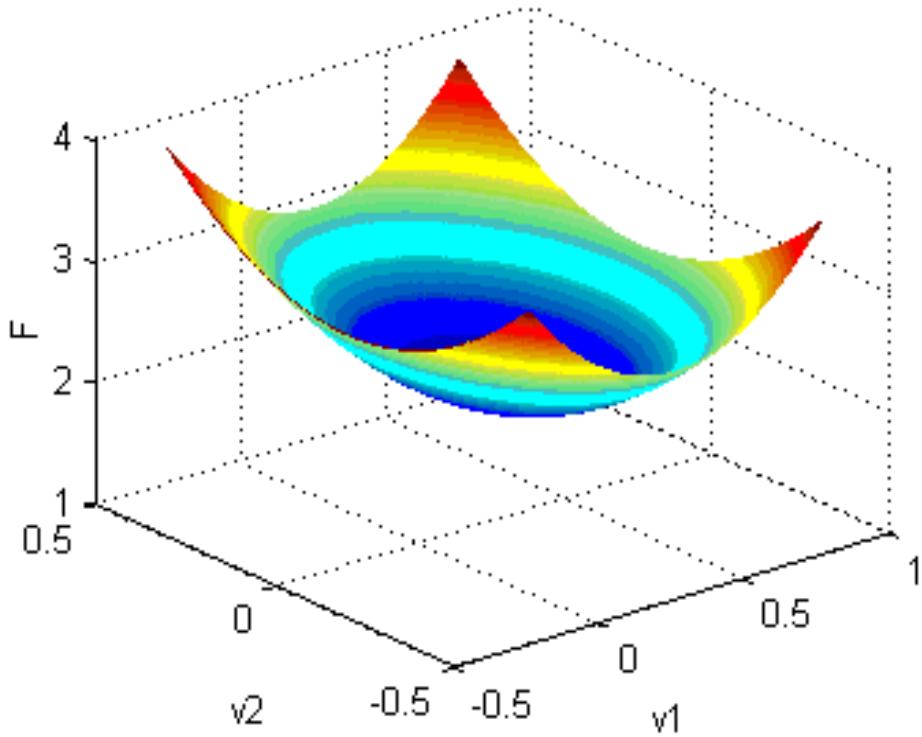


Рис. 3. Фрагмент целевого функционала $F(v_1, v_2)$ в контуре квадрата Q

Оптимизация функционала (12) позволяет определить координаты ИИП с минимальной прогнозной интенсивностью ИИП в точках (x_i, z_i) , $i=1, \dots, 4$. При этом утверждение 2 и формула (5), представляющая координаты стационарной точки функционала $F(v)$, определяют вариацию опорной точки (x_ω, z_ω) :

$$(v_1^*, v_2^*) = (0.25, 0).$$

Собственные числа матрицы B^* из утверждения 2 соответственно равны

$$\lambda_1 = 9.8759, \lambda_2 = 10.8025,$$

что указывает с учетом (7) на наличие экстремальной точки

$$(x^*, z^*) = (0.5, 0.5),$$

отвечающей положению источника излучения поля, минимизирующему несанкционированный сканирующий сигнал в комплексе точек (x_i, z_i) , $i=1, \dots, 4$. Данный результат с учетом данных табл. 1 верифицируют комплекс ОРИЭП в решении задачи обеспечения скрытности ИИП.

В главе 3 также рассмотрены результаты эксперимента, в котором в качестве источника электромагнитного излучения был взят ПЭВМ с монитором Samsug SynMaster 753S. В качестве анализатора электромагнитного поля был

выбран программно-аппаратный комплекс проведения специальных исследований «Легенда-05М», предназначенный для автоматического измерения напряженности электромагнитного поля, расчета утечки за счет наводок на цепь электропитания и др.

При выполнении измерений напряженности электромагнитного поля измеряют напряженность электромагнитного поля в точках возможного несанкционированного зондирования электромагнитного сигнала ИИП. Расчет оптимальных координат установки ИИП производился внутри квадрата Q с угловыми точками

$$(x_1, z_1) = (-1, 0.4), (x_2, z_2) = (1, 0.4), (x_3, z_3) = (1, -0.4), (x_4, z_4) = (-1, -0.4).$$

В качестве опорного вектора ω из квадрата Q выбран $(\omega_1, \omega_2) = (-1, 0.4)$.

Данные эксперимента и моделирования

Таблица 2

Номер эксперимента	Координаты источника поля		Модуль вектора напряженности электромагнитного поля в точках пеленгации (эксперимент)				Модуль вектора напряженности электромагнитного поля в точках пеленгации (модель)				
	№	x	z	w_1	w_2	w_3	w_4	\hat{w}_1	\hat{w}_2	\hat{w}_3	\hat{w}_4
1- ω	3	0,4	8.724	6.128	4.237	8.062	8.724	6.128	4.237	8.062	
2	0	0,4	13.369	13.291	5.237	5.43	13.3686	13.4876	5.2372	5.4298	
3	1.5	0.9	6.124	8.732	0.344	15.072	6.1239	9.8659	0.3441	15.072	
4	1.5	0	13.277	13.36	12.634	16.193	13.2769	16.154	12.6341	16.1929	

В таблице 2 результаты эксперимента получены на основе проведенных замеров $w_i(x, z)$, где координаты (x, z) соответствуют координатам «тестовых» векторов $\delta, \xi, \omega, \zeta, \eta \in Q$:

- $(x_\sigma, z_\sigma) = (-1, 0.4)$ – первый эксперимент,
- $(x_\xi, z_\xi) = (1, 0.4)$ – второй эксперимент,
- $(x_\zeta, z_\zeta) = (1, -0.4)$ – третий эксперимент,
- $(x_\eta, z_\eta) = (-1, -0.4)$ – четвертый эксперимент,

Уравнения модели билинейно-тензорной регрессии, задающей апостериорную модель текущего состояния напряженности поля ИИП, примут аналитический вид:

$$\begin{aligned} \hat{w}_1 \bullet v &= 8.724 - 0.3344v_1 - 2.4396v_2 + 0.4046v_1^2 + 3.6594v_1v_2 - 0.1908v_2^2; \\ \hat{w}_2 \bullet v &= 6.128 - 4.2394v_1 - 1.6137v_2 - 0.6172v_1^2 + 2.4206v_1v_2 + 1.024v_2^2; \\ \hat{w}_3 \bullet v &= 4.237 - 3.4243v_1 - 4.2196v_2 - 1.0303v_1^2 + 6.3295v_1v_2 + 0.5828v_2^2; \\ \hat{w}_4 \bullet v &= 8.062 - 10.2502v_1 - 0.476v_2 - 3.7092v_1^2 + 0.714v_1v_2 + 3.0155v_2^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Сравнение колонок таблицы 2 показывают прогнозную эффективность модели (13); здесь w_i – эксперимент, \hat{w}_i – прогноз согласно уравнений (13). Соответствующие значения в этих колонках дают совпадающие значения до четвертого знака после запятой, что говорит об адекватности построенной модели.

Графическая иллюстрация изменений показателя качества (в квадрате Q), определяемая задачей оптимизации

$$\min\{F(v) = \sum_{i=1, \dots, 4} \hat{w}_i(\omega + v) : \omega + v \in Q\} \quad (14)$$

при варьировании координат вектора v относительно положения ω , приведена на рис. 5. Аналитический вид целевого функционала имеет вид:

$$F(v) = 6.78775 - 4.562084v_1 - 2.187251v_2 - 1.238028v_1^2 + 3.280876v_1v_2 + 1.107878v_2^2. \quad (15)$$

На рис. 4 видно, что целевой функционал имеет на Q одну максимальную точку и одну минимальную точки на границах нашей области. Оптимизация (15) на границе Q позволяет определить координаты ИИП с минимальной наблюдаемостью ИИП. Наименьшее и наибольшее значения достигаются в угловых точках:

$$F(v_1=-1, v_2=-1) = 16.688; F(v_1=1, v_2=-1) = 1.002.$$

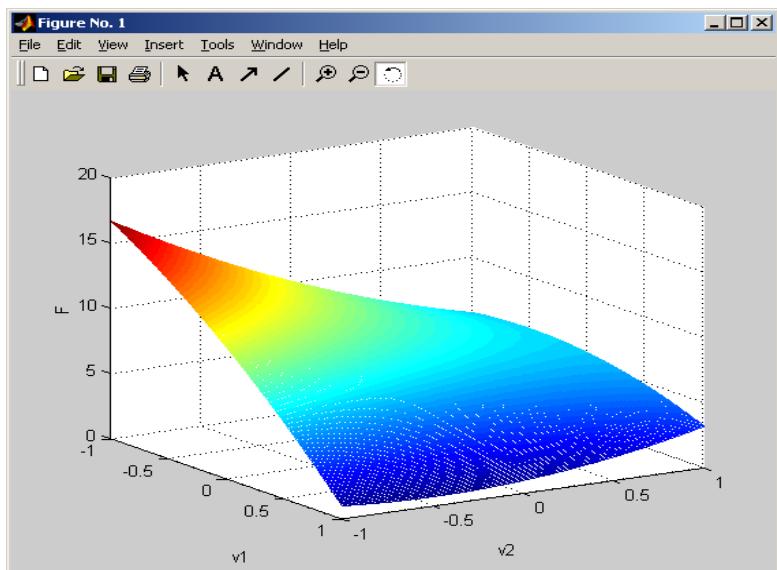


Рис. 4. Фрагмент целевого функционала $F(v_1, v_2)$ в контуре квадрата Q

В точках минимума целевого функционала следует располагать средства информатизации, а в точках максимума – генераторы шума.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы:

1. Разработана многомерная нелинейная регрессионно-тензорная модель, описывающая процесс изменения интенсивности электромагнитного поля ИЭМИ в фиксированном комплексе точек несанкционированного сканирования сигнала ИЭМИ в зависимости от варьирования координат его пространственно-угловой ориентации.

2. Построен МНК-алгоритм параметрической идентификации многомерной трехвалентной регрессионно-тензорной модели с минимальной тензорной нормой, представляющей интенсивность поля ИЭМИ в фиксированном наборе точек несанкционированного сканирования.

3. Разработаны прямой (двуvalентная модель) и итерационный (трехвалентная модель) алгоритмы автоматизированного поиска пространственно-уг-

лового положения ИЭМИ, представляющие минимизацию интенсивности поля ИЭМИ в указанном комплексе точек. Модификация алгоритма позволяет получать координаты размещения датчика искусственных помех.

4. Получены области и оценки сходимости алгоритма оптимизации пространственно-углового размещения ИЭМИ для трехвалентной регрессионно-тензорной модели сканирования сигнала ИЭМИ.

На основе полученных результатов разработан программно-алгоритмический комплекс ОРИЭП и на его базе решены задачи оптимизации размещения ПЭВМ в заданной области с учетом минимальной пеленгации сигнала наводок в фиксированной зоне сканирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Русанов В.А., Данеев Р.А., Шарпинский Д.Ю. К обеспечению электромагнитной защиты ПЭВМ методом регрессионно-тензорного моделирования её пространственно-угловой ориентации // Приборы и системы. Управление контроль, диагностика. – 2011. – № 3. – С. 7–11.

2. Русанов В.А., Данеев Р.А., Шарпинский Д.Ю. Компьютерное моделирование электромагнитной скрытности ПЭВМ // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4. – С. 126–132.

3. Русанов В.А., Данеев Р.А. Робастно-адаптивная настройка алгоритма электромагнитной защиты ПЭВМ // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 1. – С. 13–19.

4. Данеев Р.А. Регрессионно-тензорное моделирование электромагнитной защиты ПЭВМ // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 1. – С. 158–166.

5. Данеев Р.А. Об оптимальном размещении ПЭВМ на квазифрактальной поверхности // Вестник Бурятского государственного университета. – 2013. – № 1. С. 76–84.

Свидетельство о государственной регистрации программы:

6. Шарпинский Д.Ю., Русанов В.А., Данеев Р.А. Оптимальное размещение источника электромагнитного поля «ОРИЭП» // Свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2010613002 от 06.05.2010 г.

Статьи в других изданиях:

7. Данеев Р.А., Шарпинский Д.Ю. Оптимальная установка ПЭВМ: компьютерное моделирование пространственных координат // Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М., 2009. – С. 46–48.

8. Русанов В.А., Шарпинский Д.Ю., Агафонов С.В., Данеев Р.А., Думнов С.Н. Регрессионно-тензорное моделирование оптимальных режимов многофакторных когнитивных систем // Труды V Международного симпозиума «Обобщенные решения в проблемах управления – 2010». – Улан-Батор, 2009. – С. 162–163.

9. Данеев Р.А. Постановка задачи определения оптимальных координат установки ПЭВМ внутри связного геометрического контура // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2011. – С. 298–303.
10. Данеев Р.А. Программный комплекс «ОРИЭП» для определения координат размещения источника электромагнитного поля // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2012. – Т. 1. – С. 356–358.
11. Rusanov V.A., Daneev R.A. Provision of Computer Electromagnetic Protection with Aid of the Method of Optimal Orientation Regression-Tensor Modeling // Advances in Computer Science and Engineering. – 2013. – Vol. 10. – No. 2. – P. 23–40.
12. Rusanov V.A., Daneev R.A., Kumenko A.E., Sizykh V.N. Robust-adaptive Algorithm of Computer Electromagnetic Protection // Advances in Computer Science and Engineering. – 2014. – Vol. 11. – No. 1. – P. 21–37.
13. Данеев Р.А., Сизых В.Н. Экспериментальное моделирование источника электромагнитного излучения // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2014. – С. 23–31.