УДК 519.24, 519.65

В.А. Русанов, Р.А. Данеев

Об адаптивной настройке параметров источника электромагнитного излучения на геостационарной орбите

Предложена процедура оптимизации линейно-угловых параметров передающей антенны спутника на стационарной орбите с целью повышения интенсивности ее электромагнитного поля в комплексе заданных точек земной поверхности (пункты приема сигнала). Основа аналитического решения – представление ковариантными тензорами фиксированной валентности дистанционной интенсивности электромагнитного излучения в зависимости от текущих поправок ориентации диаграммы направленности и корректировки геометрических характеристик антенны.

The procedure of optimization of linear and angular parameters of the transmitting antenna end satellite in a stationary orbit in order to increase its intensity of the electromagnetic field in a complex set of points the earth's surface (collection point evaluation system) is constructed. The basis of the analytical solutions is a covariant tensor representation of a fixed valence remote electromagnetic radiation intensity depending on the current orientation of the pattern of amendments and the adjustments geometric characteristics of the antenna.

Запропоновано процедуру оптимізації лінійно-кутових параметрів передавальної антени супутника на стаціонарній орбіті з метою підвищення інтенсивності її електромагнітного поля в комплексі заданих точок земної поверхні (пункти прийому сигналу). Основа аналітичного рішення – подання коваріантними тензорами фіксованої валентності дистанційної інтенсивності електромагнітного випромінювання залежно від поточних поправлень орієнтації діаграми спрямованості та коректування геометричних характеристик антени.

Введение. В работе сформулирована и решена задача адаптивной юстировки параметров искусственного источника электромагнитного излучения (ИЭИ) на стационарной орбите в целях максимизации «взвешенно-распределенной» электромагнитной наблюдаемости сигнала ИЭИ в фиксированной группе наземных приемников. Заметим, что в результате теоретико-системных усилий, направленных на решение задач инженерного проектирования в условиях неопределенности (неполного знания существующей системы) появился концепт «адаптивной системы», когда суть адаптации состоит в том, что в реальном масштабе времени модель системы корректируется в соответствии с измеренными текущими характеристиками. Поэтому собственно понятие «адаптивная система» связано с такими качественными показателями, как критерии качества работы, цели и правила регулирования, а также оценка роли неопределенности при описании функциональных параметров системы [1].

В данном контексте востребованы операторные модели, поскольку операторный формализм позволяет в рамках одной структуры рассматривать все виды систем – непрерывную/дискретную, линейную/нелинейную, сосредоточенную/распределенную. Далее используем класс таких систем – представление ИЭИ в терминах матричной регрессионной модели [2]. Модели данных систем, с одной стороны, поддаются тензорному описанию [3], при этом, как установим, допускается достаточно детальное аналитическое описание на базе аппарата сильной дифференцируемости векторных отображений и теории экстремальных задач [4], а с другой, – на них возложена существенная роль в статистическом моделировании сложных электронных систем [5, 6], в частности, обеспечение (в рамках выбранного критерия – целевого функционала качества) понижения энергетического уровня боковых лепестков многоантенных радиометров (интерферометров) [7].

Постановка задачи

Пусть R – поле вещественных чисел, R^n – n-мерное векторное пространство над R с евклидовой нормой $\|\cdot\|_{R^n}$, $\mathrm{col}(y_1,\ldots, y_n) \in R^n$ – вектор-столбец с элементами $y_1,\ldots, y_n \in R$ и $M_{n,m}(R)$ – пространство всех $n\times m$-матриц с элементами из R и фробениусовой матричной нормой $\|D\|_F :=$ $:= (\sum d_{ij}^2)^{1/2}$, $D = [d_{ij}]$. Далее, через T_m^k обозначим пространство ковариантных тензоров k-й валентности (вещественных полилинейных форм $f^{k,m}$:

Ключевые слова: адаптивное управление, регрессионно-тензорное моделирование, квадратичная оптимизация.

$: R_1^m \times \ldots \times R_k^m \to R$) с тензорной нормой $\|f^{k,m}\|_T :=$ $:= (\sum t_{i \ldots j}^2)^{1/2}$, где $t_{i \ldots j}$ – коэффициенты (координаты [3]) тензора $f^{k,m}$, значения которых заданы относительно стандартного базиса в R^m.

Пусть в процессе юстировки поля ИЭИ $\{b_i\}_{1 \le i \le n}$ – комплекс стационарных точек наземного приема сигнала ИЭИ (т.е. радиус-векторы, соединяющие антенну и $\{b_i\}_{1 \le i \le n}$, постоянны), $\omega \in R^m$ – некоторый фиксированный (опорный) вектор совместных пространственно-угловых параметров ИЭИ [7], v – регулируемая вариация вектора ω (v – адаптивная настройка параметров антенны ИЭИ), $w(\omega+v) \in R^n$ – вектор интенсивности калибровочного сигнала ИЭИ в точках b_i, $1 \le i \le n$. В такой постановке выделим класс нелинейных операторных систем «вход–выход», описываемых векторно-тензорным уравнением многофакторной регрессии вида

$$w(\omega + v) = c + Av + \mathrm{col}\Big(\sum_{j=2,\ldots,k} f_1^{j,m}(v,\ldots, v),\ldots, \sum_{j=2,\ldots,k} f_n^{j,m}(v,\ldots, v)\Big) + \varepsilon(\omega,v), \qquad (1)$$

где $c \in R^n$, $A \in M_{n,m}(R)$, $f_i^{j,m} \in T_m^j$, вектор-функция $\varepsilon(\omega,\cdot)$: $R^m \to R^n$ класса $\|\varepsilon(\omega,v)\|_{R^n} = o((v_1^2 + \ldots + v_m^2)^{k/2})$, $v = \mathrm{col}(v_1,\ldots,v_m)$.

Постановка задач адаптации ИЭИ: (i) для фиксированного индекса k, заданного $\omega \in R^m$ и открытой окрестности $\Omega \subset R^m$, $\omega \in \Omega$ определить аналитические условия, при которых вектор-функция $w(\cdot)$: $\Omega \to R^n$ (интенсивность поля ИЭИ в точках b_i, $1 \le i \le n$) удовлетворяет системе (1) с некоторыми $c, A, f_i^{j,m}$, $1 \le i \le n$, $1 \le j \le k$;

(ii) построить алгоритм апостериорной оценки $c, A, f_i^{j,m}$, $1 \le i \le n$, $1 \le j \le k$ из решения двухкритериальной задачи идентификации регрессионной модели (1):

$$\min \Big(\sum_{l=1,\ldots,q} (\|w_{(l)} - c - Av_{(l)} - \mathrm{col}(\textstyle\sum_{j=2,\ldots,k} f_1^{j,m}(v_{(l)},\ldots,v_{(l)}),\ldots, \sum_{j=2,\ldots,k} f_n^{j,m}(v_{(l)},\ldots,v_{(l)}))\|_{R^n})^2\Big)^{1/2}, \qquad (2)$$

$$\min \Big(\|c\|_{R^n}^2 + \|A\|_F^2 + \sum_{i=1,\ldots,n} \sum_{j=2,\ldots,k} \|f_i^{j,m}\|_T^2\Big)^{1/2};$$

здесь $w_{(l)} \in R^n$, $v_{(l)} \in R^m$, $1 \le l \le q$ – векторы экспериментальных данных ($w_{(l)}$ – *реакция* на *вариацию* $v_{(l)}$, $\|v_{(l)}\|_{R^m} < 1$ относительно вектора $\omega \in R^m$), q – число экспериментов (ограничений на q не накладываем; см. замечание 1);

(iii) в предположении разрешения задач (i) – ii) определить вариацию $v^* \in R^m$ вектора ω, дающую максимальную *взвешенно-распределенную* интенсивность $F(v^*)$ сигнала ИЭИ в точках b_i, $1 \le i \le n$:

$$\max \{F(v)\colon v \in R^m\},\ F(v) = \sum_{i=1,\ldots,n} r_i w_i(\omega + v), \qquad (3)$$

где координаты вектора $\mathrm{col}(w_1(\omega+v),\ldots, w_n(\omega+v)) = w(\omega+v) \in R^n$ имеют представление согласно идентифицированной модели (1) в силу (2), r_i – весовые коэффициенты, отражающие *приоритет* точек зондирования b_i, $1 \le i \le n$.

Регрессионно-тензорная модель ИЭИ

На базе аналитических свойств векторных регрессий (1), похожих на поведение голоморфных функций, исследуем задачу (2). В связи с этим дальнейшее изложение основывается на понятии производной Фреше [4]. Последнее положение ставит задачу определения сопутствующих аналитических конструкций, в частности, системы (1) как формулы Тейлора [4] для векторных отображений, через сильные производные, увязанные с тензорными конструкциями; известно [3, 4], что тензоры и сильные производные можно (и удобно) интерпретировать как некоторые геометрические конструкции с полилинейной структурой.

Следующее утверждение устанавливает существенное аналитическое свойство (задача (i) предыдущего раздела), которым должна обладать вектор-функия w, с целью прояснения вопроса: когда w удовлетворяет (при некоторых предположениях) понятию многомерной нелинейной тензорной регрессии класса (1).

Утверждение 1. Пусть Ω – открытая область в R^m и w – отображение из Ω в R^n. Если в $\omega \in \Omega$ существует производная Фреше $w^{(k)}(\omega)$ порядка k, которая является равномерно непрерывной функцией от ω в Ω, то вектор-функция w: $\Omega \to R^n$ удовлетворяет системе (1) с некоторыми тензорами $f_i^{j,m} \in T_m^j$, $1 \le i \le n$, $1 \le j \le k$, вектором $c = w(\omega) \in R^n$ и $(n \times m)$-матрицей $A = w^{(1)}(\omega)$.

В утверждении 1 формулируется качественный факт для существования нелинейной регрессии (1) – тензорная модификация формулы Тейлора [4] для векторных отображений (утверждение [4, с. 495] о дифференцируемой зависимости от начально-краевых условий и параметров дифференциального уравнения ИЭИ).

Уточним конструкцию системы (1), рассмотрев случай $k=2$; это позволит в следующем разделе не привлекать сложных вычислительных схем при определении оптимального вектора координат установки ИЭИ (задача (3)). В такой постановке нелинейное уравнение (1) примет вид квадратично-векторной системы

$$w(\omega+v)=c+Av+\mathrm{col}(v^{\mathrm{T}}B_1v,\dots,v^{\mathrm{T}}B_nv)+\varepsilon(\omega,v), \quad (4)$$

где знак «$^{\mathrm{T}}$» – транспонирование, $B_i \in M_{m,m}(R)$, $i=1,\dots,n$ (считаем, что B_i – верхние треугольные матрицы [8]), $\|\varepsilon(\omega,v)\|_{R^n}=o(v_1^2+\dots+v_m^2)$; согласно теореме п. 12 [9, с. 189], утверждению 1 и формулам (18), (21) [4, с. 491] имеем

$$c = w(\omega),\ A = w^{(1)}(\omega),$$
$$2\mathrm{col}((\cdot)^{\mathrm{T}}B_1(\cdot),\dots,(\cdot)^{\mathrm{T}}B_n(\cdot)) = w^{(2)}(\omega).$$

Идентификацию в векторно–матрично–тензорной постановке (2) для многосвязной нелинейной модели типа *черный ящик* в классе регрессий (4) свяжем с понятием канонического решения по методу наименьших квадратов (МНК) для конечномерной системы линейных алгебраических уравнений. В этих целях используем [8] конструкцию *нормального псевдорешения* системы линейных уравнений $Dx = d$, $D \in M_{q,p}(R)$, $d \in R^q$, когда решение образует вектор $x \in R^p$, имеющий наименьшую норму $\|x\|_{R^p}$ среди всех векторов, приносящих минимум норме $\|Dx-d\|_{R^q}$.

В такой постановке обозначим через E_q – единичную $q{\times}q$-матрицу и пусть $D \in M_{q,p}(R)$. Далее, через D^+ обозначим псевдообратную матрицу Мура–Пенроуза [8] для матрицы D; асимптотическая конструкция матрицы D^+ имеет вид $D^+=\lim\{D^{\mathrm{T}}(DD^{\mathrm{T}}+\tau E_q)^{-1}\colon \tau\to 0\}$; условимся, что везде далее знак «$^+$» означает операцию псевдообращения соответствующей матрицы. Тогда (согласно задаче 8 [8, с. 501]) вектор $x=D^+d$ представляет нормальное псевдорешение линейной системы $Dx=d$, $D\in M_{q,p}(R)$, $d \in R^q$.

Далее, для взаимоувязывания параметров системы (4) и эмпирических данных в (2) обозначим через $\hat{u}_{(l)}\in R^{1+m(m+3)/2}$ вектор, имеющий с учетом верхней треугольной структуры матриц B_i, $i=1,\dots,n$ следующее координатное представление

$$\hat{u}_{(l)} := \mathrm{col}(1, v_{1(l)}, \dots, v_{m(l)}, v_{1(l)}v_{1(l)}, \dots,$$
$$v_{r(l)}v_{s(l)}, \dots, v_{m(l)}v_{m(l)})\in R^{1+m(m+3)/2},\ 1\le r\le s\le m, \quad (5)$$
$$\mathrm{col}(v_{1(l)}, \dots, v_{m(l)}) := v_{(l)}\in R^m,\ \|v_{(l)}\|_{R^m} < 1,\ 1\le l\le q.$$

Назовем $U:=[\hat{u}_{(1)}, \dots, \hat{u}_{(q)}]^{\mathrm{T}} \in M_{q,1+m(m+3)/2}(R)$ *полной матрицей* экспериментальных данных входных воздействий соответственно $\beta_i := \mathrm{col}(w_{i(1)}, \dots, w_{i(q)}) \in R^q$ – *полным вектором* экспериментальных данных для выходного сигнала w_i ($i=1,\dots,n$); предположим, что данные U и β_i прошли предварительную оптимальную фильтрацию [10], обеспечивая предельную погрешность измерения. Далее, сообразуясь с линейно-параметрическим описанием коэффициентов нелинейной модели *вход–выход* для выходного ИЭИ-сигнала w_i выпишем согласно системе уравнений (4) линейно-квадратичную форму правой части уравнения его регрессии:

$$c_i+\sum_{1\le j\le m} a_{ij}v_j+\sum_{1\le g\le p\le m} b_{igp}v_gv_p\ (i=1,\dots,n). \quad (6)$$

Теперь введем в рассмотрение $(1+m(m+3)/2)$-вектор z_i параметров модели ИЭИ

$$c_i, a_{i1}, \dots, a_{im}, b_{i11}, \dots, b_{igp}, \dots, b_{imm}$$

для модели регрессии (6). Очевидно, что в силу уравнений (6) любой фиксированный набор из n таких векторов полностью определяет (задает) аналитическое представление модели относительно некоторой системы *вход–выход* типа (4):

$$z_i := \mathrm{col}(c_i, a_{i1}, \dots, a_{im},$$
$$b_{i11}, \dots, b_{igp}, \dots, b_{imm})\in R^{1+m(m+3)/2},\ 1\le g\le p\le m.$$

Утверждение 2. Параметрическая идентификация (2) в терминах регрессионной модели (4) имеет алгебраическое решение

$$z_i^* = U^+\beta_i,\ i=1,\dots,n; \quad (7)$$

здесь U – полная матрица экспериментальных данных входных воздействий (5), β_i – полный вектор экспериментальных данных выходного сигнала w_i ($i = 1, \ldots, n$), индуцированного воздействиями (5).

Доказательство. Система (4) для каждого l-го эксперимента согласно соотношениям (5), (6) приобретает компактный вид

$$w_{i(l)} = \hat{u}^{\mathrm{T}}_{(l)} z_i + \varepsilon_{i(l)},\ i = 1, \ldots, n.$$

Таким образом, если переформулировать (очевидным способом) оптимизационную задачу (2) в векторно-матричных терминах z_i, β_i, U, то придем к следующей многокритериальной постановке относительно векторов z_i, $i = 1,\ldots,n$:

$$\min \|\beta_1 - Uz_1\|_{R^q},\ \min \|z_1\|_{R^{1+m(m+3)/2}},$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\min \|\beta_i - Uz_i\|_{R^q},\ \min \|z_i\|_{R^{1+m(m+3)/2}},$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\min \|\beta_n - Uz_n\|_{R^q},\ \min \|z_n\|_{R^{1+m(m+3)/2}}.$$

Очевидно, что данная многокритериальная система имеет нормальное псевдорешение (7) относительно переменных z_i, $i = 1, \ldots, n$.

Следствие 1 [11]. Пусть $z_i^* = U^+\beta_i$ ($i = 1, \ldots, n$). Тогда каждый вектор z параметров регрессионно-матричной модели (4) такой, что имеется $z \neq z_i^*$ и удовлетворяет одному из двух условий:

(∗) $$\|\beta_i - Uz\|_{R^q} > \|\beta_i - Uz_i^*\|_{R^q},$$

или, в противном случае:

(∗∗) $$\|\beta_i - Uz\|_{R^q} = \|\beta_i - Uz_i^*\|_{R^q},$$
$$\|z\|_{R^{1+m(m+3)/2}} > \|z_i^*\|_{R^{1+m(m+3)/2}}.$$

Замечание 1. Качественные оценки (∗), (∗∗) зависят от *объема* апостериорной информации (количества экспериментов q), а именно, если $q > 1 + m(m + 3)/2$, то, как правило, реализуется ситуация пункта (∗), если $q \leq 1 + m(m + 3)/2$ – весьма вероятно, что имеется позиция, выраженная в (∗∗).

В следующем разделе приступим к многомерному геометрическому исследованию *минимаксных* свойств аналитических решений нелинейной векторной регрессии (4). Существенной чертой полученных далее аналитических результатов в решении оптимизационной задачи (3) будет их явная алгебраическая зависимость от идентифицированных параметров регрессионно-матричной системы (4).

Адаптивная оптимизация параметров ИЭИ

Идентификация функциональной модели ИЭИ класса (4), исследованная в предыдущем разделе, по существу определяет адаптивность процесса выбора вариации $v^* \in R^m$ линейно-угловых характеристик ИЭИ. Алгоритмических вариантов подобной настройки очевидно много, и необходимо выбрать из них оптимальный с учетом некоторого *физико-технического* критерия, характеризующего качество юстировки ИЭИ. Рассмотрим критерий оптимальности (3) (с выбором коэффициентов r_i, $1 \leq i \leq n$ согласно, например, [12] или учетом следствия 2) и обсудим алгоритмическую схему получения оптимальной вариации v^* опорного вектора ω.

Утверждение 3. Пусть $D_i := (B_i + B_i^{\mathrm{T}}) \in M_{m,m}(R)$, $i = 1, \ldots, n$, где B_i – i-я матрица идентифицированной модели (4). Тогда интенсивность $J_i(v) := w_i(\omega + v)$ сигнала ИЭИ в точке b_i может иметь внутренний экстремум только в точке

$$v_i^* = -D_i^{-1} A^{\mathrm{T}} e_i \in R^m, \tag{8}$$

где $\{e_1, \ldots, e_n\}$ – стандартный базис в R^n.

Если $v^{\mathrm{T}} D_i v$ – отрицательно определенная квадратичная форма, то функционал $J_i(v)$ имеет в точке v_i^* максимум (v_i^* – стационарная точка эллиптического типа).

Если $v^{\mathrm{T}} D_i v$ – положительно определенная квадратичная форма, то $J_i(v)$ претерпевает в v_i^* минимум (v_i^* – стационарная точка эллиптического типа).

Если $v^{\mathrm{T}} D_i v$ принимает как положительные, так и отрицательные значения с $v^{\mathrm{T}} D_i v \neq 0$ при $v \neq 0$, то экстремум отсутствует (v_i^* – точка гиперболического типа; седловая точка).

Доказательство. Наметим в общих чертах доказательство выдвинутого утверждения. Для показателя качества $J_i(v)$ на множестве значений модели (4) необходимое условие локального экстремума определяется уравнением

$$\mathrm{col}(\partial(e_i^{\mathrm{T}} A v + 2^{-1} v^{\mathrm{T}} D_i v)/\partial v_1, \ldots$$
$$\ldots, \partial(e_i^{\mathrm{T}} A v + 2^{-1} v^{\mathrm{T}} D_i v)/\partial v_n) = 0 \in R^n,$$

которое определяет [4, с. 500] в R^m (пространство линейно-угловых параметров ИЭИ) координаты (8) стационарной точки v_i^* функционала $J_i(v)$.

С другой стороны знакоопределенность второго дифференциала

$$d^2J_i(v^*) = \sum_{1\le g\le m}\sum_{1\le p\le m} \partial^2 J_i(v)/\partial v_g \partial v_p \big|_{v^*} v_g v_p$$

определяет в точке размещения ИЭИ с координатами (8) достаточные условия [4] экстремума для стационарной точки v_i^*.

Координаты стационарной точки (8) позволяют ответить на вопрос о прогнозируемом значении функционала $J_i(v_i^*)$, когда v_i^* – точка внутреннего максимума (минимума).

Следствие 2. Если матрица D_i есть отрицательно определенной (аналогично положительно определенной), то максимальное (минимальное) значение $J_i(v^*)$ равно $c_i - e_i^{\mathrm{T}} A D_i^{-1} A^{\mathrm{T}} e_i/2$, где c_i – i-я координата вектора $c \in R^n$ системы (4).

Поскольку для функционала *взвешенно-распределенной* наблюдаемости ИЭИ формально имеем $F(v) = r_i\ J_i(v) + \ldots + r_i\ J_i(v)$, то утверждение 3 и формула (8) позволяют вычислить стационарную точку v^* задачи оптимизации (3); координаты вектора $v^* \in R^m$ определяют в терминах идентифицированных коэффициентов системы (4) оптимальные *физико-технические* параметры режима функционирования ИЭИ:

Утверждение 4. Стационарная точка $v^* \in R^m$ задачи (3) по максимизации взвешенно-распределенной (в комплексе зондирования $\{b_i\}_{1\le i\le n}$) интенсивности $F(v)$ сигнала ИЭИ имеет вид (необходимые условия разрешимости (3))

$$v^* = -(r_1 D_1 + \ldots + r_n D_n)^{-1} A^{\mathrm{T}} \mathrm{col}(r_1, \ldots, r_n), \quad (9)$$

где $D_i := (B_i + B_i^{\mathrm{T}})$, $i = 1, \ldots, n$.

Достаточным условием равенства

$$F(v^*) = \max\ \{F(v)\colon v \in R^m\}$$

будет положение: стационарная точка (9) имеет эллиптический тип вида

$$\det\,[d_{ij}]_p < 0,\ p = 1, \ldots, m\,, \quad (10)$$

где $[d_{ij}]_p \in M_{p,p}(R)$ – главные подматрицы [8] матрицы $D := (r_1 D_1 + \ldots + r_n D_n)$, что эквивалентно: собственные числа λ_i матрицы D соответствуют неравенствам

$$\lambda_i < 0,\ i = 1, \ldots, m. \quad (11)$$

Замечание 2. Если алгебраические условия (10) (равносильно (11)) не выполняются, то критическая точка (9) – либо гиперболическая (т.е. седловая), либо параболическая точка и, следовательно, требуется дополнительный анализ *параметров–координат* ИЭИ, соответствующих (9); более формально – наличие седловой точки гарантирует смена хотя бы в одном (но не во всех) отношении неравенства «$<$» из (10), (11) на «$>$», при этом аналогичная смена «$<$» на «$\le$», возможно вызывает структуру параболической точки.

Изложенный подход расширяет процедуры верификации астроприборов [13–15], при этом, если прогнозируемые координаты стационарной точки (9) по каким-либо физико-техническим параметрам выходят за область, адекватно сопрягающую регрессионную и физическую модель ИЭИ, то необходимо провести дополнительный эксперимент, т.е. осуществить замер характеристик ИЭИ (с вектором v, близким к точке (9)) с внесением полученного результата в расширенную матрицу экспериментальных данных U. Затем необходимо выполнить пересчет изложенных этапов процесса адаптивной оптимизации параметров ИЭИ [16] (возможно, используя обобщенный МНК [17]); при необходимости подобный эксперимент, а также двухкритериальную идентификацию (2) и оптимизацию (3) необходимо повторить.

Заключение. Описание модели ИЭИ в терминах дифференциальной модели и регрессионно-тензорного представления (1) адекватны в силу утверждения о дифференцируемой зависимости решения дифференциального уравнения от начально-краевых условий и параметров, а также утверждения 1. Поэтому одной из главных задач было дать точное и удобное определение обратной задачи электродинамики как нелинейной векторной регрессии на языке тензорной алгебры, когда нелинейные регрессионные модели были бы компактны и удобны в обращении. В связи с этим предложено оценивать векторно-матричные параметры регрессионно-тензорной модели ИЭИ как *взвешенно-распределенной* интенсивности сигнала ИЭИ от группы наземных приемников в результате псевдообращения информационной матрицы экспериментальных данных. Алгоритм идентификации регрессионно-матричной модели ИЭИ согласно предложенным критериям обеспечивает оптимальную *робастно-адаптивную* настройку комплексных линейно-угловых параметров передающей антенны ИЭИ.

Изложенные идеи можно развить в нескольких направлениях теоретико-прикладных изысканий по совершенствованию предложенных алгоритмов оптимальной ориентации ИЭИ в привязке к юстировке его геометрической компоновки, а также расширению рамок адекватности регрессионных уравнений дистанционной интенсивности ИЭИ на комплексе точек зондирования при дополнительном исследовании [18] следующих факторов нелинейности математической модели ИЭИ:

• на разработку процедуры выбора весовых коэффициентов r_i, $1 \le i \le n$ в (3), обеспечивающих эллиптический характер стационарной точки (9) функционала $F(v)$, исходя из условий (11) в привязке к теореме 6.3.12 [8];

• на расширение, согласно утверждению 1, уравнений регрессии (4) *тейлоровским разложением* вектор-функции $v \mapsto w(\omega + v)$ на базе ковариантных тензоров валентности $k > 2$ при интервальных множествах помех [19];

• на задачу оптимизации (3) в постановке нелинейного программирования при $k > 2$, $v \in \in V \subset R^m$, V – ограниченная, несвязная, невыпуклая область.

1. *Ackerman J.* Robust control: systems with uncertain physical parameters. – New York: Springer-Verlag, 1993. – 404 p.
2. *Дрейпер Н.Р.*, *Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
3. *Акивис М.А.*, *Гольдберг В.В.* Тензорное исчисление. – М.: Наука, 1972. – 352 с.
4. *Колмогоров А.Н.*, *Фомин С.В.* Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1976. – 544 с.
5. *Ковель А.А.*, *Покидько С.В.* Математическое планирование эксперимента при отработке электронных элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. – Т. 51, № 8. – С. 13–17.
6. *Степенной* закон распределения в статистике отказов в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов / Л.М. Каримова, О.А. Круглун, Н.Г. Макаренко и др. // Космические исследования. – 2011. – Т. 49, № 5. – С. 470–475.
7. *Оптимальные* оценки параметров сигналов малоразмерного источника радиотеплового излучения в двухантенном радиометре / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко, В.В. Павликов и др. // Докл. РАН. – 2013. – Т. 449, № 3. – С. 281–285.
8. *Хорн Р.*, *Джонсон Ч.* Матричный анализ. – М.: Мир, 1989. – 656 с.
9. *Банах С.* Дифференциальное и интегральное исчисление. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
10. *Волосюк В.К.*, *Кравченко В.Ф.* Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 704 с.
11. *Ланкастер П.* Теория матриц. – М.: Наука, 1982. – 268 с.
12. Теория выбора и принятия решений. / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский и др. – М.: Наука, 1982. – 328 с.
13. *Управление* движением космического платформенного комплекса. V. Алгоритмы юстировки комплекса / И.Н. Алешин, В.В. Батурин, А.В. Молоденков и др. // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2002. – № 3. – С. 132–139.
14. *Лебедев Д.В.*, *Ткаченко А.И.* Калибровка информационно-измерительного комплекса космического аппарата, предназначенного для съемки земной поверхности // Проблемы управ. и информ. – 2004. – № 1. – С. 101–120.
15. *Лебедев Д.В.*, *Ткаченко А.И.* Параметрическая юстировка комплекса «камера и звездный датчик», установленного на низкоорбитальном космическом аппарате // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2013. – № 2. – С. 153–165.
16. *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.
17. *Сарычев А.П.* Идентификация параметров систем авторегрессионных уравнений при известных ковариационных матрицах // Проблемы управ. и информ. – 2012. – № 3. – С. 14–30.
18. *Ross G.J.* Nonlinear Estimation. – New York: Springer-Verlag, 1990. – 237 p.
19. *Kreinovich V., Lakeyev A.V., Rohn J., Kahl P.* Computational complexity and feasibility of data processing and interval computational. – Dordrecht: Kluwer. 1998. – 472 p.

Поступила 18.09.2014
Тел. для справок: +7 3952 36-5093 (Иркутск, Россия)
E-mail: *v.rusanov@mail.ru*, *daneev@mail.ru*,

●