

Диагностирование интегрированной навигационной аппаратуры потребителя на основе метода многомерной линейной экстраполяции

С. Г. Бурлуцкий¹, А. В. Назаров²

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

¹sergey_burluckiy@mail.ru, ²naz-av@mail.ru

Аннотация. Тенденция оснащения навигационной аппаратурой потребителя (НАП) различных систем и комплексов на заводах изготовителей обуславливает массовое использование интегрированных НАП глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Однако, в силу технических особенностей интеграции, а также типовых циклов применения, например, навигационно-пилотажных комплексов летательных аппаратов, бортовых комплексов управления космических аппаратов, контроль потребительских свойств интегрированной НАП невозможен. Разработан подход, позволяющий на основе известного метода многомерной линейной экстраполяции осуществлять контроль и прогнозирование потребительских характеристик интегрированной НАП, на основе прецедентов навигационно-временных определений НАП – конструктивных аналогов, т. е. образцов навигационной аппаратуры, доступной для непосредственного контроля.

Ключевые слова: НАП, контроль потребительских характеристик, многомерная линейная экстраполяция, прецедентное прогнозирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Интегрированная навигационная аппаратура потребителя (НАП) не является средством измерений и, в силу нормативно-правовых требований и конструктивно-технологических особенностей ряда систем и комплексов, не проходит периодическую метрологическую поверку в части параметров функционального использования (ПФИ), т.е. параметров, характеризующих потребительские свойства навигационной аппаратуры.

Степень неопределенности значений ПФИ спустя значительный временной промежуток технической эксплуатации интегрированной НАП после проведения заводских калибровок и контрольных проверок постоянно возрастает. Причинами накопления погрешностей параметров навигационно-временных определений (НВО), обусловленных фактором времени, могут служить:

- постоянное изменение состава группировки навигационных космических аппаратов (НКА) по сравнению с составом, существовавшим на момент производства и испытаний встраиваемого образца интегрированной НАП;
- деградация материалов электронной компонентной базы НАП;

- снижение мощности навигационных сигналов НКА (в составе группировки часть КА излучают навигационный сигнал пониженной мощности);
- наличие помех: шумовых, гармонических, сигналоподобных и др.;
- наличие геометрических условий для многолучевости или ограниченного числа наблюдаемых НКА в сочетании с неблагоприятным геометрическим фактором.

Строгий аналитический (в вероятностной постановке) учет влияния совокупности упомянутых факторов на текущие или прогнозные ПФИ невозможен в силу размерности пространства признаков и неопределенности степени влияния каждого фактора. Однако, получить решение с достаточной для решения задач управления комплексами и системами достоверностью позволяет подход многомерной пространственной экстраполяции ПФИ, основанный на алгоритмах многомерной линейной экстраполяции (МЛЭ) [1, 2].

II. МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Исходной предпосылкой метода является наличие конечного множества точек в пространстве ситуаций, где определены некоторые решения, в общем виде это области в пространстве, образованном компонентами трех численных векторов табл. 1 и одного скаляра: 1) условий применения интегрированной НАП – вектора V ; 2) конструкторско-технологических характеристик (КТХ) – вектора Z ; 3) ПФИ – вектора Y ; 4) времени технической эксплуатации интегрированной НАП – t .

Каждый параметр или характеристика в табл. 1 представлены в непрерывной числовой шкале, и при использовании в расчетах настоящих методов линейно нормируются в диапазон $[0, 1]$. Характеристики, именуемые как «тип...», «критерий» также приводятся к непрерывной числовой шкале, бинарные свойства «возможность...» кодируются бинарным кодом.

Задача экстраполяции состоит в том, чтобы оценить значение вектора решения в ситуации, которой не содержится в указанном множестве. Это нужно сделать, опираясь на относительное положение такой точки-ситуации среди точек, где известно решение.

ТАБЛИЦА 1 ВАРИАНТ СОСТАВА ВЕКТОРОВ НАБЛЮДАЕМЫХ (ВЕКТОРЫ Z и V) И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАП (ВЕКТОР Y)

Конструкторско-технологические характеристики НАП (известные данные) Z	Условия применения НАП (наблюдаемые параметры) V	ПФИ (прогнозируемые параметры) Y
Степень интеграции ассистирующей технологии Assisted GNSS, 1 – нет; 2 – данные поступают в дискретные моменты времени; 3 – данные поступают непрерывно. [1...3]	Среднее число навигационных космических аппаратов (НКА), сигналы которых использованы в ходе обсервации для мультисистемного приёмника, [4...20]	Среднеквадратическая погрешность определения абсолютных координат местоположения, м [0,01...30]
Характеристика ближней зоны поверхности, влияющая на многолучевость, и др., 1 – не влияет, 2 – влияет слабо, 3 – влияет сильно.	Погрешность эфемерид (эквивалентная погрешность расчёта псевдодалности с учётом знания положения НКА), м. [0,2...3]	Среднеквадратическая погрешность определения составляющих вектора скорости, м/с. [0,01...0,1]
Количество каналов обнаружения навигационных сигналов. [8...72]	Погрешность частотно-временной информации (эквивалентная погрешность расчёта псевдодалности с учётом ЧВИ НКА), м [0,2...3]	Среднеквадратическая погрешность определения параметров угловой ориентации, градусов [0,01...0,1]
Возможность ведения параллельного поиска (по задержке и/или частоте), 1 – есть, 2 – нет. [1, 2]	Среднее отклонение уровня мощности навигационных сигналов НКА в ходе обсервации в %, [1...50]	Среднеквадратическая погрешность определения секундной метки времени ГНСС, с [0,01...0,1]
Чувствительность приемника в холодный старт, ДВт. [-145... -160]	Среднее значение пространственного геометрического фактора при обсервации. [1...12]	Среднее время «холодного старта», с [5...1200]
Тип модели потребителя, (ширина полосы схемы слежения за фазой). [1,2,3]. 1 – стационарный, 2 – подвижный, 3 – высокودинамичный	Предельная погрешность расчёта тропосферных поправок на зенитных углах места (по уровню вероятности 0,95), м. [0,005...10]	Среднее время восстановления в случае потери навигационного сигнала (время «теплого старта»), с [1...60]
Параметр кольца слежения за задержкой. Астатизм сглаживающих фильтров. [1,2,3]	Температурные отклонения окружающей среды от номинальных, в % от шкалы диапазона. [-100...+100]	Среднее время «горячего старта», с. [0,5...10]
...	...	...

Под решением подразумевается средневзвешенное геометрическое место точек в пространстве ПФИ. В качестве условий применения используется параметризованное описание статистических характеристик рабочих сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и помеховой обстановки, геометрический фактор, при известных оценках всех типов погрешностей, кроме аппаратных.

Пусть достоверность контроля и прогнозирования ИНАП определяется скалярной функцией двух векторных аргументов X и Y : $Q = Q(X, Y)$, где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ – вектор статистических характеристик ПФИ, вычисленных на интервале времени T ;

$X = (v_1, v_2, \dots, v_g, z_1, z_2, \dots, z_l, t)^T$ – вектор статистических характеристик НВО, включающих условия применения, КТХ и время технической эксплуатации интегрированной НАП. Для конечного числа условий НВО и КТХ $X^i, i = \overline{1, k}$ протокола наблюдений Ω_1 наблюдаемых (не интегрированных) НАП достоверно известны значения векторов ПФИ $Y^i, i = \overline{1, k}$. Требуется распознать прогнозные (или текущие в случае контроля) значения вектора ПФИ Y^{k+1} ИНАП путем синтеза и использования векторной функции F_1 (рис. 1) векторного аргумента X^{k+1} , не содержащегося в протоколе наблюдений Ω_1 .

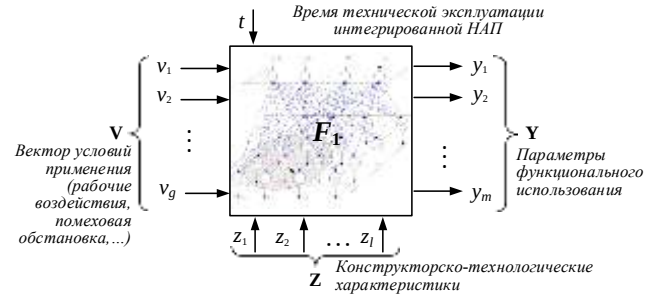


Рис. 1. Векторная функция векторного аргумента $Y = F_1(V, Z, t)$ функционирования ИНАП

Параметры векторной функции F_1 неизвестны, их требуется восстановить по конечному числу k реализаций векторного аргумента X и соответствующих им значениям вектора Y протокола наблюдений Ω_1 . Множество векторов $X^i, i = \overline{1, k}$, описывающих условия НВО НАП обозначим $\{X\}$, а множество зарегистрированных соответствующих векторов ПФИ $Y^i, i = \overline{1, k}$ – через $\{Y\}$. По условию применения МЛЭ $k < n + 1$, где $n = g + l + 1$ – размер вектора X . Каждая компонента вектора Y (табл. 1) получена по результатам НВО в течении некоторого времени обсервации T . Протокол наблюдений Ω_1 представлен матрицей размером $k \times (g + l + m)$ вида

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} v_1^1, v_2^1, \dots, v_g^1, & z_1^1, z_2^1, \dots, z_l^1, & t^1, & y_1^1, y_2^1, \dots, y_m^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^k, v_2^k, \dots, v_g^k, & z_1^k, z_2^k, \dots, z_l^k, & t^k, & y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V^1 Z^1] Y^1 \\ \dots \dots \\ [V^k Z^k] Y^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^1 Y^1 \\ \dots \dots \\ X^k Y^k \end{bmatrix}.$$

Уравнения для элементов векторных подпространств (гиперплоскостей) $\{X\}$ и $\{Y\}$ имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} \{X\} &= X^1 + \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i (X^{i+1} - X^1); \\ \{Y\} &= Y^1 + \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i (Y^{i+1} - Y^1). \end{aligned} \quad (1)$$

Так как преобразование $X \rightarrow Y$ линейно, то

$$\lambda_i = \mu_i, \quad i = \overline{1, k-1}.$$

При $k < n + 1$, задача восстановления функции F_1 допускает бесчисленное множество решений.

Неоднозначность решения устраняется использованием функции Φ , которая ставит каждой паре $\mathbf{X}^1$ и $\mathbf{X}^2$ в соответствие скаляр, характеризующий степень схожести условий НВО:

$$\Phi(\mathbf{X}, \mathbf{X}') = \|\mathbf{X} - \mathbf{X}'\|^2. \quad (2)$$

В случае евклидова расстояния каждому вектору условий НВО $\mathbf{X} \in \{\mathbf{X}\}$ ставится в соответствие его ортогональная проекция $\mathbf{X}'$ на линейное подпространство $\{\mathbf{X}'\}$. Параметры λ_i , определяющие вектор $\mathbf{X}' \in \{\mathbf{X}'\}$, ближайший в соответствии с функцией Φ к вектору $\mathbf{X} \in \{\mathbf{X}\}$, можно найти из системы уравнений

$$\partial \Phi / \partial \lambda_i = 0, \quad i = \overline{1, k-1}.$$

III. ИЛЛЮСТРАЦИЯ МЕТОДА

Проиллюстрируем применение метода на основе МЛЭ в двумерном пространстве условий и результатов НВО, используя два линейных параметризованных пространства: двумерное пространство условий НВО $\mathbf{X}$ (рис. 2 а), где каждый эксперимент определяется парой параметров x_1 «чувствительность приемника» и x_2 «среднее отклонение уровня мощности навигационных сигналов НКА от номинала в ходе обсервации», и пространство решений $\mathbf{Y}$ (рис. 2 б), в котором каждое НВО определяется двумя параметрами y_1 «среднеквадратическая погрешность определения абсолютных координат местоположения» и y_2 «среднее время «холодного старта».

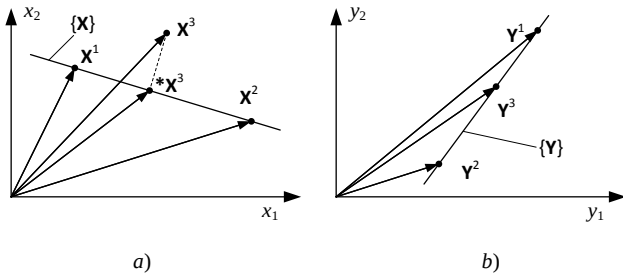


Рис. 2. Линейная экстраполяция по двум обучающим векторам на плоскости: а) пространство условий НВО, б) пространство показателей качества НВО – ПФИ ИНАП

Значения векторов $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2, \mathbf{Y}^1, \mathbf{Y}^2$ должны быть получены для некалиброванных НАП- конструктивных аналогов, либо калиброванных в одно и то же время, что и интегрированная НАП, для того чтобы аргумент времени систематических аппаратных погрешностей был одинаков. Если НАП-конструктивные аналоги подвергались периодической проверке и междиапазонным и межлитерным калибровкам, то необходимо выполнить операцию «декалибровки», которая обеспечивает подобия условий НВО в части рабочих сигналов ГНСС.

Пусть проведено два эксперимента по НВО с использованием некалиброванных (декалиброванных) НАП – конструктивных аналогов интегрированной НАП в сходных условиях $\mathbf{X}^1 = (x_1^1, x_2^1)^T$, $\mathbf{X}^2 = (x_1^2, x_2^2)^T$, и получены два решения, т.е. зарегистрированы ПФИ ИНАП в ходе НВО: $\mathbf{Y}^1 = (y_1^1, y_2^1)^T$, $\mathbf{Y}^2 = (y_1^2, y_2^2)^T$. Необходимо

осуществить прецедентное (поисковое) прогнозирование или контроль ПФИ ИНАП в новых условиях НВО $\mathbf{X}^3$, с вычислением параметров качества навигационного решения $\mathbf{Y}^3$, располагая только информацией об описаниях $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2, \mathbf{Y}^1, \mathbf{Y}^2$. В случае существенного различия масштабов пространств признаков $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$ может потребоваться приведение данных к единичному масштабу $[0,1]$ путем линейной нормировки каждого значения переменных на диапазон разброса их значений.

Через известные ситуации $\mathbf{X}^1$ и $\mathbf{X}^2$ строится прямая, представляющая линейное подпространство условий НВО $\{\mathbf{X}\}$, а через точки $\mathbf{Y}^1$ и $\mathbf{Y}^2$ – строится прямая, представляющая линейное подпространство ПФИ ИНАП $\{\mathbf{Y}\}$ (рис. 3.3). Для новой ситуации $\mathbf{X}^3$ определим ближайшую точку на подпространстве НВО, для чего опустим перпендикуляр из точки $\mathbf{X}^3$ на линию $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2$. Получим точку $*\mathbf{X}^3$, являющуюся отображением точки $\mathbf{X}^3$ на подпространство условий НВО, которая делит отрезок $\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2$ в определенной пропорции. Разделив отрезок $\mathbf{Y}^1 \mathbf{Y}^2$ в пространстве $\{\mathbf{Y}\}$ в этой же пропорции λ , получим прогноз ПФИ $\mathbf{Y}^1$, соответствующий новым условиям НВО $\mathbf{X}^3$. Подпространства условий НВО и ПФИ определяются как:

$$\{\mathbf{X}\} = \mathbf{X}^1 + \lambda(\mathbf{X}^2 - \mathbf{X}^1),$$

$$\{\mathbf{Y}\} = \mathbf{Y}^1 + \mu(\mathbf{Y}^2 - \mathbf{Y}^1),$$

где λ и μ – коэффициенты пропорциональности.

Для соответствия $\mathbf{X}^1 \rightarrow \mathbf{Y}^1$, $\mathbf{X}^2 \rightarrow \mathbf{Y}^2$ коэффициенты пропорциональности должны быть равны $\lambda = \mu$, т.е. если условия НВО лежат на прямой $\{\mathbf{X}\}$, то соответствующие им ПФИ лежат на прямой $\{\mathbf{Y}\}$. Если условия НВО $\mathbf{X}$ не лежат на этой прямой (как, например, $\mathbf{X}^3$), вводится функция соседства между ситуациями. Условия НВО, не-лежащие на прямой $\{\mathbf{X}\}$, отождествляются с ближайшей к ней ситуацией, лежащей на этой прямой (проекция точки $\mathbf{X}^3$ на прямую). Далее, применяя гипотезу о линейности, находим вектор ПФИ $\mathbf{Y}^3$, оптимальный (относительно заданной метрики функции соседства) в условиях НВО $\mathbf{X}^3$, по формуле:

$$\mathbf{Y}^3 = \mathbf{Y}^1 - \mu(\mathbf{Y}^2 - \mathbf{Y}^1).$$

Рассмотрим последовательность этапов метода прецедентного прогнозирования ПФИ интегрированной НАП при $k = 3 < n + 1$, где $n = 5$ – размер вектора $\mathbf{X}$, а k – число прецедентов протокола наблюдений Ω_1 . Пусть имеются результаты эксперимента по НВО с использованием НАП-конструктивных аналогов, включающие три вектора КТХ и условий НВО: $\mathbf{X}^1 = (z_1^1, z_2^1, v_1^1, v_2^1, v_3^1)^T$, $\mathbf{X}^2 = (z_1^2, z_2^2, v_1^2, v_2^2, v_3^2)^T$, $\mathbf{X}^3 = (z_1^3, z_2^3, v_1^3, v_2^3, v_3^3)^T$ и три соответствующих вектора результатов НВО – ПФИ: $\mathbf{Y}^1 = (y_1^1, y_2^1)^T$, $\mathbf{Y}^2 = (y_1^2, y_2^2)^T$

и $\mathbf{Y}^3 = (y_1^3, y_2^3)^T$. В процессе технической эксплуатации потребовалось осуществить поисковый прогноз ПФИ ИНАП, КТХ и условия применения которой представлены вектором $\mathbf{X}^4 = (z_1^4, z_2^4, v_1^4, v_2^4, v_3^4)^T$. Данные сведены в табл. 2, где в первых двух строках указаны КТХ и условия применения НАП-конструктивных

аналогов на интервале обсервации 10 мин (обозначены переменными x_i).

ТАБЛИЦА II ФРАГМЕНТ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И УСЛОВИЙ ПОИСКОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПФИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАП

Y		X				
СКП координат местоположения, м y_1	Среднее время «холодного старта», с y_2	Количество корреляторов x_1	Чувствительность ДБВт x_2	Среднее отклонение мощности сигнала, %, x_3	Погрешность ЧВИ, м x_4	Среднее число наблюдений НКА, x_5
2	15	64	-173	2	0,4	12
5	100	16	-156	15	0,8	8
3	30	48	-170	10	3	14
?	?	12	-160	5	2	10

В четвертой строке указаны КТХ и условия НВО ИНАП, ПФИ которого необходимо распознать.

В соответствии с выражением (1) по каждой координате $x_i^k, i = \overline{1,5}, k = \overline{1,3}$ составляется подпространство известных условий НВО:

$$\{X\} = \left\{ \begin{aligned} &(0,8750 - 0,75\lambda_1 - 0,25\lambda_2), (0,28 + 0,68\lambda_1 + 0,12\lambda_2), \\ &(0,0204 + 0,2653\lambda_1 + 0,1633\lambda_2), (0,0714 + 0,1429\lambda_1 + 0,9286\lambda_2), \\ &(0,5000 - 0,2500\lambda_1 - 0,125\lambda_2) \end{aligned} \right\}.$$

В соответствии с выражением (2) вводится квадратичная функция соседства новых условий НВО X^4 и подпространства $\{X\}$:

$$\begin{aligned} \Phi(\{X\}, X^4) = \|\{X\} - X^4\|^2 = &(0,8125 - 0,5376\lambda_1 - 0,5001\lambda_2)^2 + \\ &(0,68\lambda_1 + 0,12\lambda_2 - 0,52)^2 + \\ &(0,2653\lambda_1 + 0,1633\lambda_2 - 0,0612)^2 + \\ &(0,1429\lambda_1 + 0,9286\lambda_2 - 0,5715)^2 + \\ &(0,125 - 0,2500\lambda_1 - 0,125\lambda_2)^2. \end{aligned}$$

Далее минимизируется функция соседства Φ , для чего приравнивается ее производная по переменным λ_1 и λ_2 нулю:

$$\begin{cases} \partial\Phi/\partial\lambda_1 = 1,8086\lambda_1 + 0,8465\lambda_2 - 1,8228 = 0, \\ \partial\Phi/\partial\lambda_2 = 2,338\lambda_2 + 0,8465\lambda_1 - 2,05 = 0. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, находятся переменные λ_1 и λ_2 .

$$\lambda_1 = 0,7194, \quad \lambda_2 = 0,6164.$$

Построив подпространство НВО ИНАП по формуле

$$Y^4 = Y^1 + \lambda_1(Y^2 - Y^1) + \lambda_2(Y^3 - Y^1),$$

вычисляются экстраполированные характеристики ИНАП y_1 : «СКП определения абсолютных координат местоположения, м» и y_2 : «Среднее время «холодного старта», с»:

$$y_1^4 = y_1^1 + 0,7194(y_1^2 - y_1^1) + 0,6164(y_1^3 - y_1^1) = 6,83 \text{ м},$$

$$y_2^4 = y_2^1 + 0,7194(y_2^2 - y_2^1) + 0,6164(y_2^3 - y_2^1) = 85,4 \text{ с}.$$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная форма использования МЛЭ для диагностирования интегрированной НАП позволяет достаточно надежно решать задачу восстановления функции потребительских характеристик в условиях информационной недостаточности в пространствах малой размерности. С ростом размерности пространства НВО растут вычислительные трудности, связанные с хранением больших массивов информации. Этих трудностей можно избежать, если построить алгоритм вычислений в параллельном вычислительном базисе, например, на основе самоорганизующихся карт Кохонена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Растринин Л.А., Пономарев Ю.П. Экстраполяционные методы проектирования и управления. М.: Машиностроение, 1986. 120 с.
- [2] Агладзе В.А., Пономарев Ю.П. Рекуррентная форма метода многомерной линейной экстраполяции. В кн.: Машинные методы обнаружения закономерностей. Рига: Рижский политехнический институт, 1981. С. 73-76.