

УДК 621.396.968

Писарчук А.А., канд. техн. наук

МЕТОДИКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Житомирский военный институт им. С.П. Королева
Национального авиационного университета

Предложена методика объединения траекторной информации от нескольких измерителей для высокоточного определения параметров орбит космических объектов. Эффективность предложенного подхода показана на примере определения полного вектора координат объекта наблюдения при объединении информации от доплеровских измерителей

Для использования результатов функционирования космической инфраструктуры Украины в прикладных областях науки и техники (решение навигационных, телекоммуникационных, народнохозяйственных и оборонных задач) важно иметь точные данные про параметры орбит космических объектов (КО) [1]. Причем требования к точностным характеристикам параметров траектории движения КО постоянно ужесточаются. В связи с этим задача повышения точности определения координат КО является актуальной.

Точность определения координат КО главным образом определяется потенциальной точностью измерителя координат объекта наблюдения, а также информационной избыточностью исходных данных, используемых для определения координат параметров движения объекта наблюдения [2].

Повышение потенциальных точностей измерителя координат или расширение его возможностей по получению больших информационных массивов анализируемых данных требует, как правило, модернизации аппаратной части, что является долгим и дорогостоящим процессом. Повышение же точности определения координат цели за счет увеличения информационной избыточности путем объединения нескольких измерителей в единую многопозиционную систему требует проведения организационных мероприятий, а также разработки специального математического обеспечения, что является относительно более быстрым,

дешевым, а следовательно и предпочтительным подходом.

В качестве измерителей параметров движения космического объекта можно рассматривать радиолокационные станции, квантово-оптические и командно-измерительные системы.

Следует отметить, что при объединении информации от нескольких измерителей наблюдается два положительных момента:

1. Увеличивается общее время наблюдения за КО, что позволяет получать дополнительную временную избыточность информации об исследуемом процессе движения динамического объекта.

2. Имеет место параметрическая избыточность данных, выраженная в получении измерений одних и тех же параметров траектории КО от нескольких измерителей.

В свою очередь, на математическое обеспечение процесса обработки траекторной информации от нескольких измерителей возлагается задача качественного использования как временной, так и параметрической избыточности. При этом необходимо учитывать особенности информационного объединения разнородных измерителей, обусловленные, прежде всего, различиями в принципах их функционирования, несинхронизированной работой по времени измерения параметров траектории космического объекта и пространственным разнесением зон обзора. Существуют также различия в составе и точностных характеристиках измеряемых параметров траектории движения КО.

В литературе [3-5] рассмотрено ряд подходов, позволяющих учитывать избыточность информации, обусловленную объединением нескольких измерителей в еди-

ную систему. Однако все они ориентированы на объединение чаще всего однотипных измерителей, синхронизированных в пространстве и по времени. Поэтому известные подходы [3-5] не могут быть использованы для учета избыточной информации при объединении разнородных измерителей координат КО.

Таким образом, целью статьи является разработка методики информационного объединения разнородных измерителей, обеспечивающей высокие точности определения параметров траектории движения КО.

Постановка задачи

Положение КО в пространстве относительно измерителя характеризуется компонентами вектора в радиолокационной системе координат (РЛСК) [6]

$$\bar{a} = |r_0, r_1, \beta_0, \beta_1, \varepsilon_0, \varepsilon_1|^T, \quad (1)$$

где $r_0, \beta_0, \varepsilon_0$ – соответственно дальность, угол места и азимут цели; $r_1, \beta_1, \varepsilon_1$ – скорости изменения соответствующих координат.

Причем непосредственному измерению подлежит только часть компонент вектора \bar{a} , остальные определяются косвенными способами [6]. Помимо включенных в состав вектора параметров КО в РЛСК измеряться могут и ускорения по выбранным координатам, например измерения второй производной по дальности в радиолокационных станциях. Состав траекторной информации определяется предназначением измерителя координат КО, иными словами, положение цели на орбите для разнотипных измерителей будет характеризоваться различными по составу векторами измеренных координат КО:

$$\bar{a}_i = |A_i|^T, \quad i = 1 \dots d, \quad (2)$$

где d – количество измерителей в системе;

A_i – характеризует совокупность измеренных в i -м измерителе параметров траектории КО.

Радиолокационная (пунктовая) система координат имеет привязку к точке стояния измерителя, поэтому вектора (2) неинформативны для реализации процесса объединения нескольких измерителей в многопозиционной системе. Для унификации процесса обмена траекторной информацией, координаты КО представляются векторами шести параметров в выбранной геоцентрической системе координат, например, в геоцентрической абсолютной системе координат (ГАСК). Вектор параметров траектории КО в ГАСК имеет вид

$$\bar{b} = |x_0, x_1, y_0, y_1, z_0, z_1|^T, \quad (3)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты;

x_1, y_1, z_1 – скорости изменения соответствующих координат КО.

Тогда для каждого измерителя имеем:

$$\bar{b}_i = |B_i|^T, \quad i = 1 \dots d, \quad (4)$$

где \bar{b}_i – вектор координат КО в ГАСК для i -го измерителя;

B_i – совокупность координат КО в ГАСК для измерителя с номером i .

Переход от вектора \bar{a} к вектору \bar{b} реализуется согласно схеме, представленной на рис.1 [6].

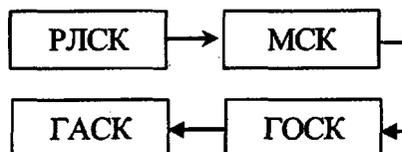


Рис. 1.

На схеме введены обозначения: МСК – местная система координат; ГОСК – геоцентрическая относительная система координат. Переход от вектора \bar{a} к \bar{b} возможен при наличии всех шести компонент вектора координат КО в РЛСК. Однако в общем виде можно всегда найти зависимость:

$$\bar{a} = F\bar{b}, \quad (4)$$

где F – обобщенная матрица перехода от вектора координат КО в ГАСК к вектору параметров в РЛСК согласно схемы (рис.1).

Компоненты векторов \bar{a} и \bar{b} являются статическими характеристиками, то есть содержат информацию о положении КО в вы-

бранный момент времени, что является неполной характеристикой для исследования процесса движения динамического объекта. Поэтому, если судить о траектории движения КО, необходимо рассматривать математические модели, характеризующие изменение во времени компонент векторов \bar{a} и \bar{b} .

Обозначим изменение во времени выбранной компоненты вектора \bar{a}_i как $A_i(t)$, а \bar{b}_i – как $B_i(t)$. Тогда с учетом принятых обозначений выражение (3) преобразуется к виду

$$A_i(t) = f_i(B_i(t)), \quad (4)$$

где f_i – характеризует переход от компонент вектора \bar{a}_i к \bar{b}_i .

Далее необходимо сформировать аналитические модели функций $A_i(t)$ и $B_i(t)$.

Для описания траектории движения КО на орбите примем модель невозмущенного движения, что допустимо для малого по отношению к периоду обращения времени наблюдения объекта (что характерно для задач сопровождения КО) [4, 6].

Невозмущенное движение космического объекта в центральном поле тяготения Земли описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{\bar{B}}_i(t) + \frac{K_3 \bar{B}_i(t)}{r^3(t)} = 0, \quad (5)$$

где $K_3 = 3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^3$ – гравитационная постоянная Земли;

$B_i(t)$ – модель изменения выбранной координаты КО в ГАСК;

$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$ – радиус-вектор, соединяющий центр ГАСК с центром масс КО на орбите.

Для получения аналитической модели, характеризующей изменение координат КО в ГАСК, необходимо решить нелинейное дифференциальное уравнение (5). Для решения поставленной задачи применим математический

аппарат дифференциальных преобразований [7].

Дифференциальные преобразования (ДП) – это операционный метод, позволяющий в аналитическом виде решать сложные нелинейные задачи, благодаря их алгебраизации в области изображений путем дифференцирования оригинала. Базовыми операциями дифференциальных преобразований являются прямое и обратное преобразования исходной функции, реализуемые согласно выражений [7, 8]:

$$Z(k) = P\{z(t)\}_r = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k z(t)}{dt^k} \right]_r, \quad (6)$$

$$z(t) = P^{-1}\{Z(k)\} = q(t, c),$$

где t^* – значение аргумента, при котором осуществляется преобразование, в простейшем случае $t^* = 0$;

$Z(k)$ – дискретная функция целочисленного аргумента $k = 0, 1, 2, \dots$;

H – отрезок аргумента, на котором рассматривается функция $z(t)$;

$q(t, c)$ – восстанавливающая или аппроксимирующая функция;

$P\{\dots\}$, $P^{-1}\{\dots\}$ – обозначения, характеризующие соответственно прямое (получение изображения в форме дифференциального спектра (P -спектра) функции) и обратное (получение оригинала функции) дифференциальные преобразования.

Если восстанавливающая функция имеет вид многочлена, то получение оригинала сводится к суммированию дискрет ее P -спектра в виде отрезка ряда Тейлора, а ДП называют дифференциально-тейлоровскими. Если же восстанавливающая функция имеет произвольный вид, то ДП называют дифференциально-нетейлоровскими, а параметры функции $q(t, c)$ определяются из системы уравнений, образованной, например, путем приравнивания одноименных дискрет P -спектров функций $z(t)$ и $q(t, c)$ (метод баланса дифференциальных спектров (БДС)) [8].

Используя прямое и обратное ДП с тейлоровским базисом (6), решение дифференциального уравнения (5), ограничиваясь в качестве примера шестью дискретами

цесса движения КО большей, чем полиномиальный (12), и без погрешностей измерений), а вторым – экспериментальный аналог-модель с погрешностями измерений (12). Сравнивая указанные аналоги, можно объединить свойства обеих моделей, то есть адекватность неопределенного по параметрам первого аналога с определенностью второго аналога, параметры которого определены с погрешностями.

Для сравнения и объединения свойств моделей-аналогов (10) и (12) воспользуемся методом БДС в схеме дифференциально-нетейлоровских преобразований (6) [8]. В результате получим систему уравнений

$$P\{\widehat{A}_i(t)\} = P\{A_i(t)\}, \quad (13)$$

позволяющую сформировать расширенную систему вида:

$$\begin{cases} \widehat{A}_{01} = A_{01}, & \widehat{A}_{02} = A_{02}, & \dots & \widehat{A}_{0d} = A_{0d}, \\ \widehat{A}_{11} = A_{11}, & \widehat{A}_{12} = A_{12}, & \dots & \widehat{A}_{1d} = A_{1d}, \\ \widehat{A}_{21} = A_{21}, & \widehat{A}_{22} = A_{22}, & \dots & \widehat{A}_{2d} = A_{2d}, \\ \dots\dots\dots, & \dots\dots\dots, & \dots & \dots\dots\dots \end{cases} \quad (14)$$

Система (14) позволяет одновременно учесть как временную избыточность анализируемой информации в виде выборок измеряемых параметров траектории движения КО на этапе их аппроксимации и получения моделей (12), так и параметрическую избыточность, выражаемую исходными данными от нескольких измерителей, объединенных именно этой системой.

Всякий процесс объединения информации от нескольких измерителей требует решения вопроса синхронизации их работы. Иными словами, проще объединять данные о параметрах движения динамического объекта (в рассматриваемом случае КО), если измерения параметров его траектории в каждом измерителе происходит в один и тот же жестко синхронизированный момент времени. На использовании этого принципа и основаны классические подходы к объединению инфор-

мации в многопозиционных информационных системах [3-5]. Однако для решаемой задачи в качестве исходных предпосылок принято, что измерения, проводимые различными измерителями параметров траектории движения КО, не синхронизированы по времени и пространству. В этом случае предлагаемый подход позволяет учесть несинхронность работы измерителей на этапе формирования моделей (12). Тогда синхронизация измерителей осуществляется путем привязки аргумента аппроксимирующей функции (12) к одному моменту времени по единой временной шкале на этапе использования МНК. На практике такая операция реализуется путем переноса нуля сетки измерений МНК на требуемый временной интервал. В этом случае вектор параметров КО в ГАСК (искомые параметры) будет одинаков для каждого измерителя.

Для унификации процесса формирования системы уравнений вида (14) необходимо иметь ряд исходных предпосылок, связанных с ее характеристикой (система уравнений является определенной, неопределенной или переопределенной) [11, 12]. В этом случае показательным является параметр системы.

Параметром L системы вида (14) будем называть отношение количества определяемых параметров траектории КО в ГАСК – n к количеству измеренных координат в РЛСК – m :

$$L = \frac{n}{m}. \quad (15)$$

Параметр системы характеризует: существование решения системы (если $1 \leq L \leq 3$, система является определенной и имеет единственное решение; если $L < 1$, система будет переопределенной; если $L > 3$, система имеет вид неопределенной и может не иметь решения вообще или иметь множество решений);

количество подлежащих определению дискрет дифференциального спектра модели (7) и (9), когда $1 \leq L \leq 3$;

количество минимально необходимых коэффициентов аппроксимирующего полинома (12), когда $1 \leq L \leq 3$.

Неопределенность системы вида (14) говорит о необходимости привлечения до-

полнительной информации про параметры движения КО для определения заданного состава искомым параметров n . Коридор значений параметра системы $1 \leq L \leq 3$ свидетельствует о решении предложенным подходом задачи определения параметров движения динамического объекта по ограниченному составу измеряемых параметров (по данным как от одного, так и от нескольких измерителей).

Если значение параметра системы принимает значение $L < 1$, то система переопределена. Причиной появления переопределенной системы уравнений (14) является параметрическая избыточность в измеряемых параметрах траектории движения КА, обусловленная комплексированием информации от нескольких измерителей.

В случае переопределенной системы уравнений (14) количество подлежащих определению дискрет дифференциального спектра модели (7), (9) и минимально необходимых коэффициентов аппроксимирующего полинома (12) определяется составом измеряемых параметров и требованием адекватного полиномиального сглаживания измерений. Так, например, если измеряются координата дальности до КО, скорость ее измерения и ускорение, то для их использования модели (7), (9) должны содержать не менее трех дискрет, а полином (12) быть не ниже второго порядка.

Для реализации процесса определения параметров траектории движения КО по информации от нескольких измерителей в случае переопределенной системы (14) предлагается применять один из двух способов.

Первый способ базируется на использовании классических подходов к решению переопределенных систем уравнений, например, методом наименьших квадратов [9]. Тогда на основании системы уравнений (14), согласно МНК формируется функционал вида:

$$S(x_0, x_1, y_0, y_1, z_0, z_1) = (\hat{A}_{01} - A_{01})^2 + (\hat{A}_{11} - A_{11})^2 + (\hat{A}_{21} - A_{21})^2 + \dots + (\hat{A}_{02} - A_{02})^2 + (\hat{A}_{12} - A_{12})^2 + \dots + (\hat{A}_{22} - A_{22})^2 + \dots + (\hat{A}_{0d} - A_{0d})^2 + (\hat{A}_{1d} - A_{1d})^2 + (\hat{A}_{2d} - A_{2d})^2 + \dots \quad (16)$$

С использованием функционала (16) формируется система уравнений относительно искомым параметров траектории КО (компонент вектора (3)):

$$\frac{\partial S(x_0, x_1, y_0, y_1, z_0, z_1)}{\partial x_0, \partial x_1, \partial y_0, \partial y_1, \partial z_0, \partial z_1} = 0. \quad (17)$$

Решением системы (17) есть искомые параметры траектории движения КО в ГАСК с учетом параметрической избыточности измеренных данных.

Второй способ поиска параметров траектории движения КО в ГАСК при получении переопределенной системы уравнений (14) заключается в приведении ее к определенному виду путем исключения из использования тех из измеряемых параметров, которые в наибольшей степени влияют на точность определения компонент вектора \bar{b} . Отсев параметров следует проводить как в пределах одного измерителя координат КО так и для системы измерителей, оставляя наиболее точные при дуближе измеренных координат. Реализовать процедуру отсева предлагается следующим образом.

Для известной совокупности измеренных параметров формируются сочетания состава исходных данных для определения параметров траектории движения КО в ГАСК, не допуская использование вариантов, при которых параметр системы $L > 3$ (система является неопределенной). Далее для сформированных сочетаний производится расчет корреляционных матриц ошибок (КМО) определения вектора \bar{b} по вектору \bar{a} согласно выражения [13]:

$$R_{\bar{b}l} = JR_{\bar{a}l}J^T, l = 1..k, \quad (18)$$

где J – матрица Якоби, характеризующая преобразование (4);
 l – количество сформированных сочетаний состава исходных данных для проведения их анализа;

R_{ai} – диагональная КМО, составленная из дисперсий ошибок измерения компонент вектора \bar{a} и характеризующая потенциальные точности i -го измерителя. При формировании матрицы R_{ai} за нулевые принимаются значения ошибок неизмеряемых параметров траектории КО в i -м измерителе.

Далее реализуется формирование обобщенного показателя ошибки определения параметров вектора $\bar{b} - \sigma_{sl}$ в виде суммы среднеквадратических отклонений (СКО) ошибок определения координат КО в ГАСК – $\sigma_{x_0}, \sigma_{x_1}, \sigma_{y_0}, \sigma_{y_1}, \sigma_{z_0}, \sigma_{z_1}$, являющихся диагональными элементами матрицы R_{sl} :

$$\begin{aligned} \sigma_{sl} = & \sigma_{x_0} + \sigma_{x_1} + \\ & + \sigma_{y_0} + \sigma_{y_1} + \\ & + \sigma_{z_0} + \sigma_{z_1}. \end{aligned} \quad (19)$$

Выбор оптимального варианта сочетаний исходных данных осуществляется по критерию минимума обобщенной ошибки (19).

Использование в качестве критерия отбора состава измеряемых параметров обобщенной ошибки (19), характеризующей преобразование погрешностей исходных данных из РЛСК в ГАСК обусловлено следующим. В основе изложенного подхода к определению параметров траектории движения КО путем составления и решения системы уравнений (14) положено свойство ортогональных отображений моделей движения динамического объекта в разных системах координат (при получении модели-аналога (10)) [12]. Ортогональное отображение моделей в данном случае обеспечивается использованием выражения (4), что позволяет получить функциональную зависимость параметров движения КО в РЛСК от параметров этого же процесса, но в ГАСК (искомых параметров). Тогда, если обработка выборок измерений по каждому параметру, характеризующему траекторию движения КО в РЛСК, осуществляется отдельно с

использованием одного и того же алгоритма МНК, то именно преобразование (4) является определяющим фактором взаимовлияния ошибок исходных данных на результаты поиска параметров траектории движения КО в ГАСК.

Выбор для использования одного из предложенных подходов к реализации процесса расчета параметров траектории движения КО при получении переопределенной системы (14) определяется типом решаемой задачи, требованиями к оперативности и точности проводимых расчетов.

Для демонстрации порядка исключения из состава измерительной информации параметров траектории движения КО был рассмотрен расчетный пример.

Пусть в ходе сопровождения КО несколькими разнотипными измерителями получены выборки координат по четырем параметрам: дальности r_0 , угла места β_0 , азимута ε_0 и скорости изменения дальности r_1 . Среднеквадратические отклонения ошибок измерения соответствующих параметров составляет $\sigma_{r_0} = 0,1$ км, $\sigma_{\beta_0} = 0,025$ рад, $\sigma_{\varepsilon_0} = 0,005$ рад, $\sigma_{r_1} = 0,01$ км/с. По измеренным данным предполагается определить координаты КО в ГАСК – x_0, y_0, z_0 путем формирования и решения системы уравнений (14).

Расчеты показали, что для заданного состава измеренных параметров и подлежащих определению координат КО формируемая система уравнений вида (14) будет переопределена ($L = 0,6$).

Необходимо принять решение по исключению из состава измерительной информации параметров траектории движения КО, обеспечив формирование определенной системы уравнений вида (14).

Прежде всего формируются сочетания состава исходных данных, исключая для упрощения, лишь один параметр, что уже обеспечивает получение определенной системы ($L = 1$). Рассматриваемые сочетания представлены в табл.1. Знаком «плюс» обозначен используемый, а знаком «минус» – исключаемый из использования для определения координат КО в ГАСК измеренный параметр.

Таблица 1.

№	r_0	β_0	ε_0	r_1
1	+	+	+	+
2	-	+	+	+
3	+	-	+	+
4	+	+	-	+
5	+	+	+	-

Результаты расчетов обобщенной ошибки σ_{st} с использованием выражений (18), (19) представлены в табл. 2.

Таблица 2.

№	1	2	3	4	5
σ_{st}	7,170	7,167	1,305	7,00	7,169

По минимальному значению параметра σ_{st} принимается решение, что наиболее предпочтительным для получения системы уравнений (14) есть состав исходных данных третьего варианта, т.е с исключением измерений угла места КО.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать методику информационного объединения измерителей координат космических объектов, включающую этапы:

1. Расчет параметра системы согласно выражения (15) и принятие решения про тип формируемой системы уравнений вида (14) (недоопределенная, определенная или переопределенная).

2. Выработка решения про рассчитываемое количество дискрет дифференциального спектра моделей (7), (9) и порядок сглаживающего полинома (12).

3. Формирование системы уравнений (14).

4. Решение системы уравнений (14) относительно искомых параметров траектории КО в ГАСК (3) с учетом типа системы (определенная или переопределенная).

Эффективность разработанной методики исследовалась методом математического моделирования. Рассматривалась большебазовая система, состоящая из трех однотипных доплеровских измерителей, имеющих сле-

дующие технические характеристики: темп обновления информации $\Delta t = 4$ с, длину волны сигнала КО $\lambda = 1,5$ м, погрешность определения радиальной скорости по измеренной частоте Доплера составляет $\sigma_{r_1} = 5 \cdot 10^{-5}$ км/с. При моделировании была принята траектория полета космического аппарата типа «Січ-1».

Результаты математического моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3.

\bar{b}	\bar{b}_e	\bar{b}_0	$\hat{\bar{b}}$	$\sigma_{\hat{\bar{b}}}$
x_0	6942,372	6942,373	6942,266	0,38555
x_1	-1,9633	-1,9633	-1,9633	0,00022
y_0	1990,565	1990,564	1990,543	0,41504
y_1	-0,6527	-0,6527	-0,6527	0,00030
z_0	4986,036	4986,036	4986,037	0,14827
z_1	6,1238	6,1238	6,1238	0,00031

В табл. 3 обозначено: \bar{b} – компоненты вектора координат КО в ГАСК; \bar{b}_e – вектор эталонных координат КО; \bar{b}_0 – вектор координат КО в ГАСК, рассчитанный с использованием предложенной методики при отсутствии случайных ошибок измерений; $\hat{\bar{b}}$ – вектор оценок координат КО, полученный при наличии случайных ошибок в соответствии с разработанным подходом; $\sigma_{\hat{\bar{b}}}$ – среднеквадратичное отклонение ошибок расчета компонент вектора $\hat{\bar{b}}$.

Результаты исследований показывают, что предложенная методика позволяет в пределах одного сеанса наблюдения реализовать расчет параметров траектории КО с высокой точностью при объединении информации от нескольких измерителей. Ее особенностью является не критичность к когерентной работе измерителей параметров движения динамических объектов как во времени, так и в пространстве.

В последующих исследованиях планируется провести анализ влияния на точность конечных расчетов количества объединяемых измерителей, оптимизацию их расположения, а также анализ точности результатов расчетов от расположения КО относи-

тельно многопозиционной информационной системы.

Список литературы

1. Хуторовский З.Н. Ведение каталога космических объектов // Космические исследования. – 1992. – Т. 31, Вып. 4. – С. 101 – 114.
2. Белавин О.В. Основы радионавигации: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с.
3. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. проф. В.В. Цветкова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
4. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.Н. и др. // Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис», 1998. – 828 с.
5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.
6. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.
7. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. – К.: Наук. думка, 1990. – 184 с.
8. Пухов Г.Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т-преобразований. – К.: Наук. думка, 1988. – 216 с.
9. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер с англ. / Под ред. проф. Левина Б.Р. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
10. Баранов Г.Л., Баранов В.Л. Системоаналоговое и квазианалоговое моделирование // Электронное моделирование. – К., 1994. – Т. 16. – №4. – С. 57 – 62.
11. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера.: Изд. 2-е стереотип. – К.: Техніка, 1977. – 768 с.
12. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике. – М.: Наука, 1969. – 640 с.
13. Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.