ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.586
doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-1

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕКУЩЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ВВЕДЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Г. И. Козырев[1], Е. О. Юдицких[2]

[1, 2] Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
[1] gen-kozyrev@yandex.ru, [2] eug-89@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения точности телеизмерений (ТИ) изделий ракетно-космической техники в сложных условиях помеховой обстановки, в том числе при воздействии различного рода дестабилизирующих факторов, частотный спектр лежит в спектре полезного сигнала. Целью работы является разработка модели процесса текущей (в процессе эксплуатации) идентификации динамических средств телеизмерений (СрТИ) и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения минимальной структурной избыточности при малой априорной информации относительно статистических характеристик полезного сигнала и помех. *Материалы и методы.* Проведен анализ причин, влияющих на погрешность ТИ в месте эксплуатации объекта измерений. Дано подробное описание двух основных составляющих суммарной погрешности ТИ: погрешности идентификации, обусловленной отличием реального оператора СрТИ от его номинального значения вследствие воздействия на параметры реального оператора совокупности неопределенных дестабилизирующих факторов, и погрешности восстановления входного сигнала СрТИ для динамического режима измерений. Предложена модель процесса текущей идентификации динамических СрТИ и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения дополнительного измерительного канала и квазиоптимального регуляризирующего оператора, входящего в состав обратного фильтра оператора восстановления. *Результаты и выводы.* Результаты исследований могут быть использованы для повышения точности измерительных систем в динамическом режиме измерений, в том числе в условиях воздействия ДФ, частотный спектр лежит в спектре полезного сигнала, а также для метрологического самоконтроля в интеллектуальных измерительных системах.

Ключевые слова: средство телеизмерений, дестабилизирующие факторы, идентификация, структурная избыточность, восстановление, некорректность, регуляризация

Для цитирования: Козырев Г. И., Юдицких Е. О. Модель процесса текущей идентификации динамических средств телеизмерений и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения минимальной структурной избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 5–13. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-1

© Козырев Г. И., Юдицких Е. О., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

A MODEL OF THE PROCESS OF CURRENT IDENTIFICATION OF DYNAMIC MEANS OF TELE-MEASUREMENT AND RESTORATION OF TELEMETERED PARAMETERS BASED ON THE INTRODUCTION OF MINIMAL STRUCTURAL REDUNDANCY

G.I. Kozyrev[1], E.O. Yuditskikh[2]

[1, 2] Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia
[1] gen-kozyrev@yandex.ru, [2] eug-89@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of this work is due to the need to improve the accuracy of tele-measurements of rocket and space technology products in difficult interference conditions, including under the influence of various kinds of destabilizing factors (CF), the frequency spectrum lies in the spectrum of the useful signal. The aim of the work is to develop a model of the process of current (in-service) identification of dynamic means of tele-measurement (DTI) and restoration of telemetered parameters (TMP) based on the introduction of minimal structural redundancy with little a priori information regarding the statistical characteristics of the useful signal and interference. *Materials and methods.* The analysis of the reasons affecting the accuracy of the TUE at the place of operation of the measuring object is carried out. A detailed description is given of the two main components of the total TUE error: the identification error caused by the difference between the real TUE operator and its nominal value due to the effect on the parameters of the real operator of a set of uncertain DFS, and the error in restoring the TUE input signal for the dynamic measurement mode. A model of the process of the current identification of dynamic SRT and recovery of TMP is proposed based on the introduction of an additional measuring channel and a quasi-optimal regularizing operator, which is part of the reverse filter of the recovery operator. *Results and conclusions.* The research results can be used to improve the accuracy of measuring systems in the dynamic measurement mode, including under conditions of exposure to RF, the frequency spectrum lies in the spectrum of the useful signal, as well as for metrological self-monitoring in intelligent measuring systems.

Keywords: means of tele-measurement, destabilizing factors, identification, structural redundancy, restoration, incorrectness, regularization

For citation: Kozyrev G.I., Yuditskikh E.O. A model of the process of current identification of dynamic means of tele-measurement and restoration of telemetered parameters based on the introduction of minimal structural redundancy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):5–13. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-1

Введение

Операции телеконтроля являются составной частью технологических процессов обслуживания, запуска и управления в полете подвижных изделий ракетно-космической техники (РКТ). Результаты телеизмерений (ТИ) в значительной степени определяют достоверность получаемой информации об условиях применения и состояния космических средств и, следовательно, адекватность принимаемых решений реальному состоянию условий и техники [1]. Отклонение параметров измерительного тракта от их номинальных значений объясняется влиянием различного рода помех и дестабилизирующих факторов (ДФ), которые в наибольшей степени воздействуют на первичные элементы системы ТИ – датчико-преобразующую аппаратуру (ДПА). Так как конкретные значения ДФ в процессе проведения ТИ являются неизвестными (неконтролируемыми), то при отсутствии информации относительно законов их распределения подобные факторы относятся к разряду неопределенных [2]. Влияние ДФ приводит со временем к появлению скрытых (метрологических) отказов, проявляющихся в постепенном ухудшении точностных характеристик ДПА, выходящих в ряде случаев за пределы допустимых значений. Это, в свою очередь, влечет за собой получение неправильных результатов измерений и, в зависимости от места применения ДПА, может привести к непредсказуемым последствиям. Целью данной статьи является проведение анализа причин, влияющих на суммарную погрешность средств ТИ в месте эксплуатации объекта измерений – бортовой системы изделия РКТ, рассмотрение основных направлений уменьшения отдельных составляющих суммарной погрешности ТИ и разработка модели процесса проведения высокоточных ТИ с учетом воздействия различного рода помех и неопределенных ДФ.

Предварительные замечания

Рассмотрим задачу измерений значений изменяющегося во времени телеметрируемого параметра $x(t)$ на входе средства телеизмерений (СрТИ). Процедура получения результата ТИ предполагает проведение двух основных последовательных преобразований [3]: прямого $F : x(t) \to y(t)$, в ходе которого система F отображает входной сигнал $x(t)$, обычно неэлектрического типа, в промежуточный результат $y(t)$, и обратного $G : y(t) \to \hat{x}(t)$, называемого восстановлением входного сигнала.

Преобразование F носит физический характер, G, как правило, чисто вычислительный, поскольку оно связано с обработкой промежуточного результата $y(t)$.

Задачей системы обработки (СО) результатов ТИ является получение результата $\hat{x}(t)$, близкого в некотором смысле к входному сигналу $x(t)$, что подразумевает знание операторов F и (или) G.

Достижению абсолютного тождества $x(t)$ и $\hat{x}(t)$ препятствуют погрешности ТИ, суммарная величина которых обусловлена несколькими причинами (рис. 1):

1) взаимодействием чувствительного элемента СрТИ с объектом измерений (ОИ), в качестве которого выступает бортовая система (БС) изделия РКТ. Вследствие указанного взаимодействия действительный выходной сигнал ОИ (номинальный входной сигнал СрТИ $x_н$) отличается от истинного $x_и$. На вход СрТИ, кроме сигнала $x_н$, воздействуют помехи $\nu(t)$, вызванные неинформативными параметрами входного сигнала $x(t)$, а также мешающими воздействиями, однородными с измеряемой величиной, например, вибрацией для линейных акселерометров, близлежащими металлическими предметами для измерителей напряженности магнитного поля Земли и т.д. Влияние СрТИ на измеряемую величину можно свести к нулю, применяя бесконтактные методы измерения. В дальнейшем будем считать, что погрешностью за счет взаимодействия СрТИ с ОИ можно пренебречь или ее можно учесть с помощью введения поправки в результаты ТИ;

2) отклонением оператора конкретного экземпляра СрТИ от типового, которое может рассматриваться как случайное по множеству СрТИ данного типа. Градуировка СрТИ для изделий РКТ обычно носит строго индивидуальный характер, поэтому указанной погрешностью также можно пренебречь;

3) отличием реального оператора СрТИ $F_р$ от его номинальной величины $F_н$ вследствие воздействия различного рода дестабилизирующих факторов (ДФ) $\xi(t)$ (температуры, влажности, давления, ионизации и т.д.), которые в силу специфики ТИ, проводимых на борту изделий РКТ, наиболее сильно влияют на ДПА. Влияние ДФ на оператор F особенно проявляется в аварийных условиях работы СрТИ, когда реальные параметры внешней среды существенно отличаются от предусмотренных техническими условиями. Влияние ДФ $\xi(t)$ на оператор F содержит детерминированную и случайную составляющие, поэтому вариация F и обусловленная ею погрешность будут иметь такие же составляющие. Однако, учитывая, что основная доля энергии ДФ в процессе ТИ лежит в полосе частот полезного сигнала $x(t)$, будем считать, что влияние $\xi(t)$ на прямой оператор СрТИ F носит систематический характер, а случайная составляющая данной погрешности пересчитывается на выход ИС и учитывается вместе с выходным шумом измерений $\mu(t)$;

4) разницей между зарегистрированным в системе обработки реальным выходным сигналом СрТИ $y_р$ и его точным значением $y_т$ из-за влияния выходного шума измерений $\mu(t)$. Погрешность $\mu(t)$ является аддитивной по отношению к сигналу $y_т(t)$ и обычно описывается случайной функцией с нулевым средним, распределенной по нормальному или равномерному закону. При обработке выходных сигналов динамических СрТИ величина $\mu(t)$ играет существенную роль в процессе реализации процедур идентификации и особенно при восстановлении входных сигналов из-за некорректности указанных задач;

5) отклонением реального оператора $G_р$ от номинального $G_н$ из-за погрешности вычислений. При принятии специальных мер (алгоритмов с двойной точностью, расширенной масштабной сеткой и т.п.), указанной погрешностью в дальнейшем можно пренебречь.

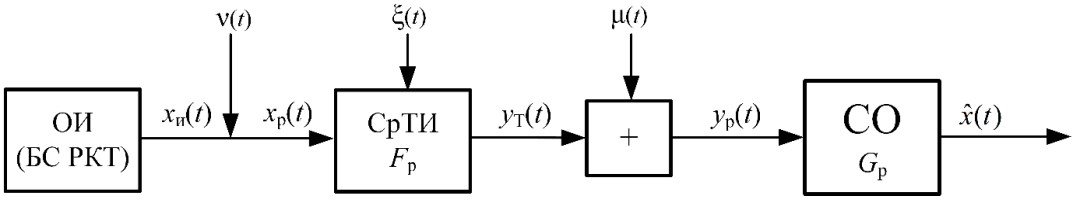

Рис. 1. Процесс получения результата телеизмерений

Разработка модели процесса текущей идентификации динамических средств телеизмерений и восстановления телеметрируемых параметров

Остановимся более подробно на третьей и четвертой составляющих суммарной погрешности ТИ: погрешности идентификации, обусловленной отличием реального оператора $F_р$ СрТИ от его номинального значения $F_н$ вследствие воздействия на параметры оператора $F_р$ совокупности неопределенных ДФ $\xi(t)$, и погрешности восстановления входного сигнала СрТИ для динамического режима измерений.

Очевидно, что снизить погрешность идентификации СрТИ можно двумя способами [4]. Первый состоит в том, чтобы принять все возможные меры по стабилизации оператора F, его независимости от внешней среды (термостатирование, экранирование и т.п.). Второй способ заключается в определении реального вида оператора F при воздействии ДФ $\xi(t)$, а затем – соответствующей коррекции результатов ТИ с учетом созданных для этого условий, например, введением структурной избыточности в измерительный тракт. Зачастую перечень ДФ в процессе эксплуатации СрТИ не всегда бывает известным. В этом случае возникает задача текущей (в процессе эксплуатации) идентификации параметров СрТИ при неизвестной совокупности ДФ, включая и полезный входной сигнал, т.е. при неизвестных входных воздействиях. Следует также отметить, что для большинства измерительных задач вычисление текущих параметров СрТИ должно производиться без использования предпосылок о стационарности входного и выходного сигналов этих измерителей (как случайных процессов) и, следовательно, без предварительного оценивания корреляционных и взаимных корреляционных функций этих сигналов с целью последующего их использования в задачах идентификации. Подход, использующий такое оценивание, в процедурах текущей идентификации параметров СрТИ невозможен даже формально из-за неизвестности входного сигнала $x(t)$. Таким образом, задача текущей идентификации параметров СрТИ применительно к практике большинства измерительных задач должна формулироваться как задача оценивания оператора СрТИ (его структуры и параметров) по результатам измерений только выходного(ых) сигнала(ов) СрТИ.

Согласно принципу многоканальности Б. Н. Петрова [5], решение подобной задачи при воздействии на оператор ИС совокупности ДФ, спектр которых лежит в спектре полезного сигнала, невозможно без введения структурной избыточности во временной или пространственной области. С практической точки зрения очень важным является исследование возможностей текущей идентификации структурно-избыточных СрТИ (СИСрТИ) при неизвестных входных воздействиях в условиях минимальной избыточности, т.е. в условиях создания всего лишь одного дополнительного измерительного канала (рис. 2).

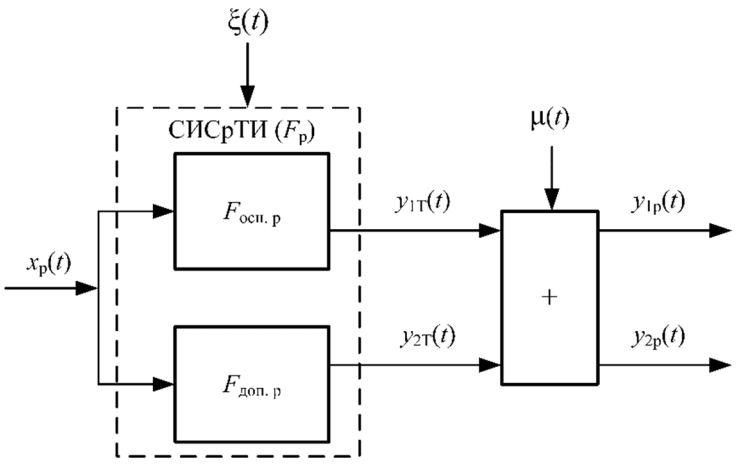

Рис. 2. Средство телеизмерений с минимальной избыточностью

Наличие дополнительных каналов в СрТИ для компенсации ДФ позволяет подойти к их синтезу и анализу с позиций теории инвариантности, развитой применительно к системам автоматического управления и регулирования [6].

Для текущей (пассивной) идентификации параметров СИСрТИ при неизвестном входном сигнале $x(t)$ необходимое условие для достижения абсолютной инвариантности СИСрТИ относительно неизвестной совокупности ДФ $\xi(t)$ заключается в некоммутативности операторов основного $F_{\text{осн}}$ и дополнительного $F_{\text{доп}}$ каналов минимально-избыточной (с одним дополнительным измерительным каналом) СрТИ [7]:

$$(F_{\text{осн}}F_{\text{доп}} - F_{\text{доп}}F_{\text{осн}})x(t) \neq 0. \quad (1)$$

Как показано в работе [7], для выполнения условия (1) при линейном операторе $F_{\text{осн}}$ необходимо, чтобы оператор $F_{\text{доп}}$ был нелинейным или нестационарным.

Выражение (1) является необходимым условием для достижения абсолютной инвариантности СИСрТИ относительно неизвестной совокупности ДФ. Достаточное же условие связано с физической реализуемостью дополнительного измерительного канала $F_{\text{доп}}$ СИСрТИ. Для статических СрТИ подобные требования заключаются в возможности реализации того или иного функционального (алгебраического) преобразования над входным воздействием. Для динамических СрТИ, описываемых с помощью дробно-рациональных передаточных функций, физическая реализуемость приводит к тому, что число нулей числителя дроби не должно превышать числа полюсов ее знаменателя.

Согласно рис. 2 параметры операторов $F_{\text{осн.р}}$ и $F_{\text{доп.р}}$ подвержены влиянию неопределенных ДФ $\xi(t)$. Задача текущей идентификации СрТИ состоит в том, чтобы при неизвестном входном сигнале $x(t)$ произвести оценку параметров оператора $F_{\text{осн.р}}$, а также, при необходимости, и оператора $F_{\text{доп.р}}$ с учетом того, что параметры обоих операторов являются нестабильными.

Воздействие одного и того же входного сигнала $x(t)$ на основной и дополнительный каналы СИСрТИ приводит к тому, что его выходные сигналы $y_{1\text{р}}(t)$ и $y_{2\text{р}}(t)$ являются связанными между собой. Это позволяет представить СИСрТИ (рис. 2) в виде эквивалентной динамической системы с оператором $F = F_{\text{доп.р}}F_{\text{осн.р}}^{-1}$, наблюдаемым «входным» $y_{1\text{р}}(t)$ и «выходным» $y_{2\text{р}}(t)$ сигналами и свести задачу текущей оценки нестабильных параметров СИСрТИ при неизвестном входном сигнале к стандартной задаче идентификации:

$$y_{2\text{р}}(t) = F_{\text{доп.р}}x(t) = F_{\text{доп.р}}F_{\text{осн.р}}^{-1}y_{1\text{р}}(t) = Fy_{1\text{р}}(t). \quad (2)$$

Обработка выходных сигналов $y_{1\text{р}}(t)$ и $y_{2\text{р}}(t)$ СИСрТИ при оценке нестабильных параметров СИСрТИ для операторов $F_{\text{осн.р}}$, $F_{\text{осн.р}}^{-1}$, $F_{\text{доп.р}}$ осуществляется в системе текущей идентификации, которая является составным элементом системы обработки.

Например, представим оператор основного измерительного канала $F_{\text{осн.р}}$ в виде линейной динамической системы 1-го порядка:

$$b(\xi)\dot{y}_{1\text{р}}(t) + y_{1\text{р}}(t) = x(t), \quad (3)$$

где $\dot{y}_{1\text{р}}(t)$ – первая производная сигнала $y_{1\text{р}}(t)$ по времени t.

Здесь текущий параметр $b(\xi)$ зависит от совокупности ДФ $\xi(t)$, т.е. является нестабильным. Параметр $b(\xi)$ можно выразить через его номинальное значение $b_{\text{ном}}$:

$$b(\xi) = b_{\text{ном}} + \Delta b(\xi),$$

где $\Delta b(\xi)$ характеризует отклонение параметра $b(\xi)$ от его номинального значения или нестабильность данного параметра.

Модель дополнительного канала СИСрТИ с учетом нелинейного преобразования L входного сигнала $x(t)$ имеет вид

$$b(\xi)\dot{y}_{2\text{р}}(t) + y_{2\text{р}}(t) = Lx(t). \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (3) и (4) при нелинейном операторе L позволяет получить общее уравнение идентификации с исключением неизвестного входного сигнала $x(t)$:

$$L\left[b(\xi)\dot{y}_{1\text{р}}(t) + y_{1\text{р}}(t)\right] = b(\xi)\dot{y}_{2\text{р}}(t) + y_{2\text{р}}(t). \quad (5)$$

Нахождение текущего параметра $b(\xi)$ из выражения (5) связано с дифференцированием зашумленных выходных сигналов СИСрТИ $y_{1р}(t)$, $y_{2р}(t)$, что является некорректной процедурой и приводит к большим погрешностям решения задачи идентификации [8]. Для исключения операций дифференцировании сигналов $y_{1р}(t)$, $y_{2р}(t)$, а также влияния краевых условий на интервале наблюдения применим метод модулирующих функций [9]. Для этого умножим скалярно обе части уравнения (4) на некоторую n раз дифференцируемую в промежутке $[0; T_н]$ модулирующую функцию $\varphi(t)$ с краевыми условиями $\varphi^{(j)}(0) = \varphi^{(j)}(T_н) = 0$, $j = \overline{0,\ n-1}$. Здесь n – порядок дифференциального уравнения, описывающего модель основного канала СИСрТИ, $T_н$ – интервал наблюдения (идентификации).

После интегрирования по частям с учетом краевых условий для модулирующей функции $\varphi(t)$ и нулевых начальных условий для основного и дополнительного каналов СИСрТИ уравнение идентификации при описании модели основного канала с помощью дифференциального уравнения n-го порядка примет вид [10]:

$$\sum_{j=1}^{n} b_j (-1)^j \left[\left\langle y_{1р}, \Phi^{(j)} \right\rangle - \left\langle y_{2р}, \varphi^{(j)} \right\rangle \right] = \left\langle y_{2р}, \varphi \right\rangle - \left\langle y_{1р}, \Phi \right\rangle, \tag{6}$$

где b_j – неизвестные параметры СИСрТИ; $\Phi(t) = L[\varphi(t)] = \varphi^2(t)$ – преобразованная модулирующая функция; $\langle p, q \rangle = \int_0^{T_н} p(t) q(t) dt$ – скалярное произведение функций $p(t)$, $q(t)$.

При описании модели основного канала СИСрТИ с помощью выражения (3), которое является дифференциальным уравнением первого порядка (n = 1), после раскрытия скалярного произведения в формуле (6) преобразованное уравнение идентификации запишем как

$$b(\xi)\left[\int_0^{T_н} y_{2р}(t)\dot{\varphi}(t)dt - \int_0^{T_н} y_{1р}(t)\dot{\Phi}(t)dt \right] = \int_0^{T_н} y_{2р}(t)\varphi(t)dt - \int_0^{T_н} y_{1р}(t)\Phi(t)dt. \tag{7}$$

В данном случае в качестве модулирующей функции можно использовать гармоническую функцию вида $\varphi(t) = \sin(2\pi t / T_н)$, $0 \le t \le T_н$.

Из выражения (7) найдем параметр $b(\xi)$:

$$\hat{b}(\xi) = \frac{\int_0^{T_н} y_{2р}(t)\varphi(t)dt - \int_0^{T_н} y_{1р}(t)\Phi(t)dt}{\int_0^{T_н} y_{2р}(t)\dot{\varphi}(t)dt - \int_0^{T_н} y_{1р}(t)\dot{\Phi}(t)dt}. \tag{8}$$

При использовании в качестве модели основного канала СИИС более общего выражения, например $b(\xi)\dot{y}_{1р}(t) + y_{1р}(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x(t)$, нелинейное предварительное преобразование входного сигнала $x(t)$ в дополнительном измерительном канале также позволяет выполнить текущую идентификацию нестабильных параметров $b(\xi)$, $a_0(\xi)$, $a_1(\xi)$ при неизвестном входном сигнале.

Также в системе текущей идентификации осуществляется расчет обратного оператора $F_{осн.н}^{-1}$ при номинальных значениях параметров основного измерительного канала для случая, когда влиянием ДФ на СрТИ можно пренебречь.

Уменьшение погрешности восстановления СрТИ связано с эффективным решением обратной задачи при работе СрТИ в динамическом режиме. Так как обратные задачи являются некорректно поставленными, то для их решения требуется принятие специальных мер для получения устойчивого решения [8]. Наиболее высокую точность восстановления дают методы, использующие максимум априорной информации. К таким методам относятся методы оптимальной фильтрации Винера и методы итерационного восстановления сигналов на основе фильтра Калмана.

При решении практических задач в процессе ТИ объем априорной информации зачастую ограничен знанием лишь максимальной частоты спектра контролируемого процесса, а также приближенными статистическими характеристиками погрешностей измерений и задания оператора СрТИ. В связи с этим приходится заменять оператор оптимальной фильтрации близким к нему квазиоптимальным регуляризирующим оператором, входящего в состав обратного

фильтра оператора восстановления, используя при этом ограниченный объем априорной информации для его построения. В работе [11] при решении подобных задач предложен алгоритм восстановления входных процессов для динамического режима ТИ в виде обратного цифрового фильтра, представленного с помощью последовательного соединения регуляризирующего предфильтра R (фильтра нижних частот (ФНЧ)) и обратного оператора F^{-1} СрТИ (рис. 3).

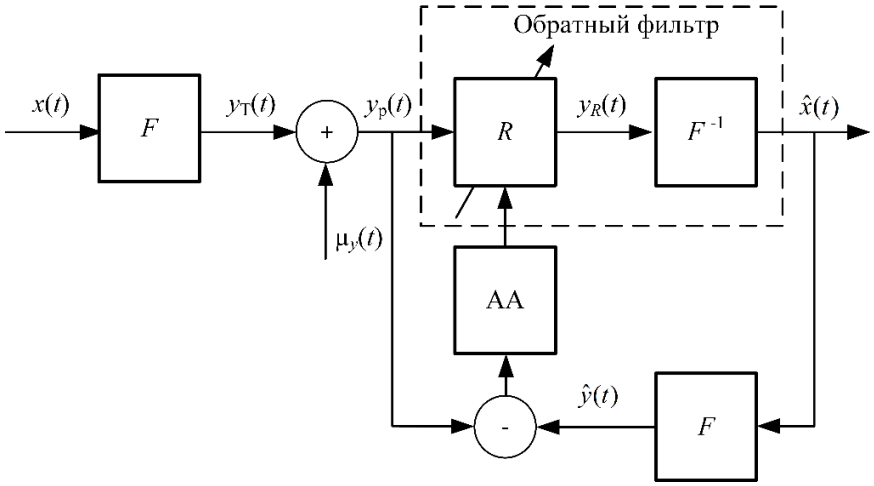

Рис. 3. Процедура восстановления входного телеметрируемого процесса $x(t)$ для динамического режима ТИ

Здесь АА – адаптивный алгоритм, с помощью которого осуществляется поиск оптимальных параметров регуляризирующего предфильтра R: частоты среза ФНЧ ω_c и его порядка n, минимизирующих обобщенную невязку $\Delta y(t) = y_{\text{р}}(t) - \hat{y}(t)$. Как показано в работе [11], процедуру минимизации обобщенной невязки выходного сигнала СрТИ можно строить лишь по одному параметру регуляризации – частоте среза предфильтра, оставляя фиксированным его порядок, что обеспечивает в сочетании с однородностью представления исходных данных, обратного оператора СрТИ и регуляризатора малые вычислительные затраты при реализации алгоритма восстановления.

Прямой $F_{\text{осн.н}}$ и обратный $F_{\text{осн.н}}^{-1}$ операторы основного измерительного канала СИСрТИ используются для расчета номинальных значений выходного и входного сигналов СрТИ с целью определения суммарных абсолютных дополнительных погрешностей ТИ, приведенные к выходу и ко входу СрТИ соответственно. Разности $\Delta x_{\Sigma} = \hat{x}_{\text{н}} - \hat{x}$ и $\Delta y_{\Sigma} = \hat{y}_{1\text{н}} - y_{1\text{р}}$ путем их сравнения с допустимыми значениями погрешности ТИ по входу и выходу СрТИ можно использовать для метрологического самоконтроля интеллектуальных СИСрТИ в процессе ТИ в статическом и динамическом режимах в зависимости от динамики изменения входного телеметрируемого параметра.

Попадание величин Δx_{Σ} и Δy_{Σ} в допуски $\Delta x_{\Sigma} \le x_{\text{доп}}$, $\Delta y_{\Sigma} \le y_{\text{доп}}$ означает, что влиянием ДФ на СрТИ в процессе эксплуатации БС изделия РКТ можно пренебречь, использовать лишь прямой измерительный канал без учета дополнительного измерительного канала СрТИ и без применения квазиоптимального регуляризирующего оператора, входящего в состав обратного фильтра оператора восстановления.

С учетом высказанных замечаний модель процесса текущей идентификации динамических СрТИ и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения минимальной структурной избыточности выглядит следующим образом (рис. 4).

Заключение

В работе рассмотрено построение модели процесса текущей (в процессе эксплуатации) идентификации динамических СрТИ при неизвестном входном сигнале на основе введения дополнительного измерительного канала и восстановления телеметрируемых параметров в виде обратного цифрового фильтра, представленного с помощью последовательного соединения регуляризирующего предфильтра (фильтра нижних частот) и обратного оператора СрТИ.

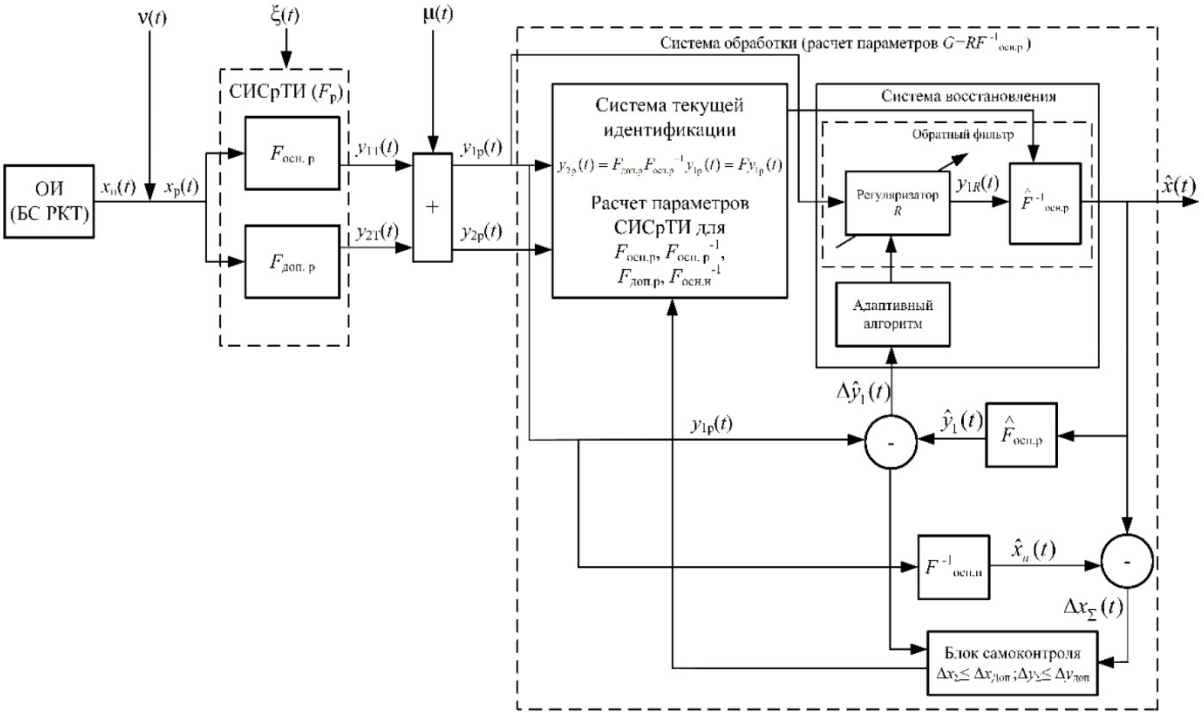

Рис. 4. Модель динамического СИСрТИ, идентификации его параметров и восстановления входного телеметрируемого процесса

Результаты исследований могут быть использованы для повышения точности измерительных систем в динамическом режиме измерений, в том числе в условиях воздействия неизвестных ДФ, частотный спектр лежит в спектре полезного сигнала, а также для метрологического самоконтроля в интеллектуальных измерительных системах.

Список литературы

1. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. [и др.]. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб. : Наука и техника, 2007. 667 с.
2. Бахшиян Б. Ц., Назиров Р. Р., Эльясберг П. Е. Определение и коррекция движения (гарантирующий подход). М. : Наука, 1980. 360 с.
3. Козырев Г. И., Усиков В. Д. Особенности синтеза обратного оператора статической структурно-избыточной измерительной системы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 5–12.
4. Земельман М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М. : Изд-во стандартов, 1972. 200 с.
5. Петров Б. Н., Викторов В. А., Лукин Б. В. Принцип инвариантности в измерительной технике. М. : Наука, 1976. 244 с.
6. Нестеров В. Н. От принципа двухканальности к теории построения инвариантных измерительных систем // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 4. С. 56–67.
7. Белорусец В. Б. Метод вспомогательных систем для идентификации динамических объектов при неизвестном входном сигнале // Автоматика и телемеханика. 1981. № 8. С. 76–82.
8. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. М. : Книга по Требованию, 2012. 228 с.
9. Шумафов М. М., Цей Р. Метод модулирующих функций и его применение при решении обратных задач // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 4, Естественно-математические и технические науки. 2008. № 9. С. 9–22.
10. Козырев Г. И., Клейменов Ю. А., Усиков В. Д. Метод текущей идентификации линейной динамической измерительной системы на основе предварительного нелинейного преобразования входного сигнала // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 8–12.
11. Козырев Г. И., Юдицких Е. О. Восстановление входных сигналов динамических измерительных систем с помощью цифровой обратной фильтрации // Измерительная техника. 2023. № 5. С. 10–16. doi: 10.32446/0368-1025it.2023-5-10-16

References

1. Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V. et al. *Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike = Modern telemetry in theory and in practice*. Saint Petersburg: Nauka i tekhnika, 2007:667. (In Russ.)
2. Bakhshiyan B.Ts., Nazirov R.R., El'yasberg P.E. *Opredelenie i korrektsiya dvizheniya (garantiruyushchiy podkhod) = Definition and correction of movement (a guaranteeing approach).* Moscow: Nauka, 1980:360. (In Russ.)
3. Kozyrev G.I., Usikov V.D. Features of synthesis of the inverse operator of a static structurally redundant measuring system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(4):5–12. (In Russ.)
4. Zemel'man M.A. *Avtomaticheskaya korrektsiya pogreshnostey izmeritel'nykh ustroystv = Automatic error correction of measuring devices*. Moscow: Izd-vo standartov, 1972:200. (In Russ.)
5. Petrov B.N., Viktorov V.A., Lukin B.V. *Printsip invariantnosti v izmeritel'noy tekhnike = The principle of invariance in measuring technology*. Moscow: Nauka, 1976:244. (In Russ.)
6. Nesterov V.N. From the principle of two-channel operation to the theory of construction of invariant measuring systems. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of wave processes and radio engineering systems*. 2020;23(4):56–67. (In Russ.)
7. Belorusets V.B. Method of auxiliary systems for identifying dynamic objects with an unknown input signal. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemechanics*. 1981;(8):76–82. (In Russ.)
8. Tikhonov A.N., Goncharskiy A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. *Chislennye metody resheniya nekorrektnykh zadach = Numerical methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2012:228. (In Russ.)
9. Shumafov M.M., Tsey R. The method of modulating functions and its application in solving inverse problems. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4, Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Adygea State University, Series 4, Natural, Mathematical and Technical Sciences*. 2008;(9):9–22. (In Russ.)
10. Kozyrev G.I., Kleymenov Yu.A., Usikov V.D. A method of current identification of a linear dynamic measuring system based on a preliminary nonlinear transformation of the input signal. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2021;(12):8–12. (In Russ.)
11. Kozyrev G.I., Yuditskikh E.O. Restoration of input signals of dynamic measuring systems using digital reverse filtering. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2023;(5):10–16. (In Russ.). doi: 10.32446/0368-1025it.2023-5-10-16

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Иванович Козырев
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

Gennady I. Kozyrev
Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of telemetry systems,
integrated information processing and protection,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Евгений Олегович Юдицких
адъюнкт,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: eug-89@yandex.ru

Evgeny O. Yuditskikh
Adjunct,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 25.10.2024
Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2024
Принята к публикации/Accepted 10.12.2024