

РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ КАНАЛ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПАРАМЕТРАМИ СЛУЧАЙНОГО СКАЧКООБРАЗНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ПРОЦЕССА

С.Н. Данилов¹, А.П. Пудовкин¹, Ю.Н. Панасюк¹, П.С. Беляев¹, Л.Г. Варепо²,
У.Р. Наимов¹, М.П. Беляев³

¹ Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

² Омский государственный технический университет, г. Омск

³ Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж

Отслеживания траектории перемещения подвижного объекта, например, летательного аппарата, низкоорбитального спутника и т.п. требует решать задачу синтеза алгоритмов функционирования измерителей, работающих в условиях скачкообразного изменения координат и их производных. Эта задача решается путем синтеза реконфигурируемых следящих измерителей, у которых в зависимости от ситуации могут изменяться как параметры так, возможно, и структура. В соответствии с выбранным методом получен реконфигурируемый алгоритм функционирования измерительной системы и его упрощенный вариант. Структура построенного канала состоит из двух обычных линейных фильтров, схемы сравнения, схемы выбора оценки. Показано, что упрощенный алгоритм с переключением в пределах принятых допущений, дает оценки с ошибками близкими к ошибкам оптимального алгоритма.

Ключевые слова: пористые материалы, блочные изделия, коэффициент диффузии, неразрушающий контроль, импульсные методы

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения качества слежения за координатами подвижных объектов (улучшение точности, помехоустойчивости) необходимо иметь радиоэлектронную следящую систему (РСС), состоящую из нескольких подсистем с различными структурами (наборами параметров), назначение которых состоит в обеспечении работы в различных режимах при изменяющейся сигнально-помеховой обстановке, наличии возможных нарушений процесса сопровождения, резкого изменения поведения параметров сигнала вследствие непредсказуемых причин.

Необходимость прогнозирования и отслеживания траектории движения транспортного средства, например, автомобиля или самолета, параметров энергетической установки и т.п. требует решать задачу надежного измерения с малой величиной ошибки в том числе и в условиях помеховых воздействий. Этот вопрос решается путем синтеза радиоэлектронных следящих систем (РСС), в которых в зависимости от ситуации могут изменяться как параметры так, возможно, и сама структура.

ТЕОРИЯ

В процессе анализа функционирования (РСС) в общем случае находят в первую очередь потенциальные ошибки путем применения аналитических методов, а затем реальные с привлечением, как правило имитационного моделирования. На первом этапе определяют

потенциальную точность систем и отдельных устройств. Исследование потенциальной точности необходимо для определения теоретически достижимой величины ошибок оценивания. Кроме того, она служит одним из важных признаков соответствия РСС предъявляемым к ней требованиям. Если показатели потенциальной точности хуже, чем требуемые, то дальнейшие действия направлены на выявление причин этого несоответствия.

Для оптимальных РСС потенциальная точность определяется величиной апостериорной дисперсии ошибок фильтрации, которая вычисляется в процессе решения соответствующих уравнений [1-3]. При этом необходимо отметить, что эта дисперсия зависит от условий применения, определяющих в моделях, входящих в РСС фильтров статистические характеристики возмущений и шумов наблюдения. Достаточно простое решение уравнений аналитическим способом возможно только для оптимальных систем небольшой размерности (2-3 уравнения в системе).

Если потенциальные ошибки соответствуют требованиям, то исследуется точность оценок в условиях, приближенных к реальным (в дальнейшем реальная точность). Основным методом исследования реальной точности является имитационное моделирование. В процессе этого моделирования определяются итоговый результат, включающий флуктуационные и динамические ошибки во всем поле возможных условий применения. Возможен

также предельный случай возрастания ошибок – расходимость процессов оценивания.

Соответствующая структурная схема алгоритма для двух видов параметров структуры представлена на рисунке 1.

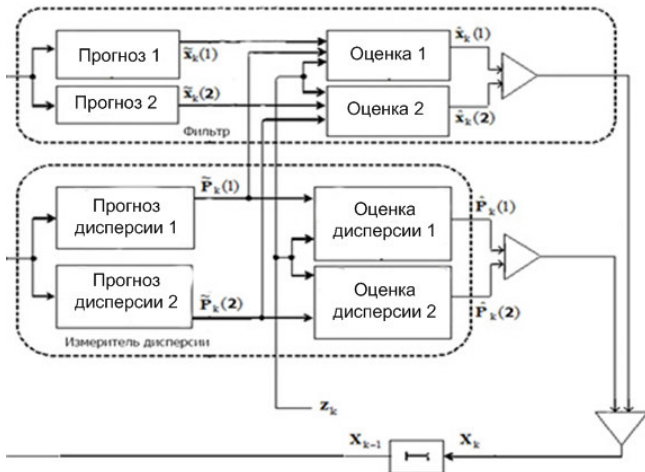


Рис. 1. Структурная схема алгоритма функционирования фильтра

Как видно из рисунка 1 вычисление осуществляется в два этапа: первый этап – прогноз, второй этап – коррекция [1, 2, 3]. При этом для каждого шага k и для каждого индекса (номера) модели s_k результат оценивания, определяемый на этапе коррекции, зависит от наблюдений z_k и прогноза, рассчитываемого на основе оценки предыдущего шага [4]. Несмотря на возможную (и часто встречающуюся в реальности) линейность модели объекта и измерителя, алгоритм фильтрации нелинеен. Это происходит потому, что оценки вектора фазовых координат зависят от случайной смены структуры.

Однако, как можно показать, реализация предлагаемого метода сопровождения вполне возможна с использованием современных вычислительных средств.

Следует отметить, что парциальные апостериорные ковариационные матрицы ошибок фильтрации, например для первого фильтра $\tilde{P}_k(1)$, получаемые в алгоритме (рисунок 1), позволяют получить представление о точности оценивания состояний линейных моделей и поэтому могут использоваться при оценке качества функционирования оптимального фильтра только в условиях, точно соответствующих предполагаемым. Точность будет оцениваться по элементам диагонали матрицы $\tilde{P}_k(1)$, которые характеризуют апостериорные дисперсии ошибок фильтрации вектора состояния: $\tilde{P}_k(1)_{11}$ – дисперсия ошибки оценивания соответствующей координаты $\tilde{P}_k(1)_{22}$ – дисперсия ошибки оценивания первой производной координаты, и $\tilde{P}_k(1)_{33}$ – дисперсия ошибки

оценивания второй производной координаты. Например, это может быть дальность до сопровождаемого объекта, скорость сближения V_r и скорость изменения $V_{\dot{r}}$.

Получение величины потенциальных среднеквадратических ошибок (СКО) оценивания фазовых координат возможно только при моделировании на ЭВМ, в связи с изменением параметров и структуры синтезированного фильтра случайным образом.

Как уже отмечалось апостериорные ковариационные матрицы ошибок фильтрации $\tilde{P}_k(1)$ зависят только от условий применения.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В таблице 1 представлены полученные в результате моделирования на ЭВМ парциальные СКО оценивания фазовых угловых координат в установившемся режиме для РЭС на основе трех парциальных моделей, составляющих три части РЭС: БФ – быстродействующий фильтр, ОФ – основной фильтр, ВФ – фильтр на основе учета волнового тренда [2,3].

Табл. 1. Ошибки оценивания фазовых координат для парциальных моделей

Предполагаемая мощность шума наблюдения, мВт	СКО оценивания фазовых координат ($\sigma_{\varphi} \cdot 10^{-4}$ радиан)		
	БФ	ОФ	ВФ
0.001	2.2	0.45	1.4
0.01	7.3	2.7	7.9
0.1	2.4	2.4	44.7

Из таблицы 1 видно, что наименьшую СКО в установившемся режиме имеет основной фильтр, так как он имеет самую узкую полосу пропускания из всех. Но при увеличении величины шума наблюдения, СКО для основного и быстродействующего фильтра практически сравниваются.

Для оценки СКО парциальных фильтров при использовании реального сигнала, необходимо построить переходную характеристику следящей системы, для чего на вход нужно подать сигнал, представляющий собой скачкообразное изменение истинного пеленга цели φ на фоне шума наблюдения ξ_{φ} при различном уровне шумов наблюдения.

Использование такого тестового сигнала позволяет оценить работу синтезированного алгоритма не зависимо от случайного характера изменения угловых координат цели и субъективности выбора конкретной реализации маневра цели.

Необходимо иметь в виду, что алгоритм фильтрации предполагает расчет только парциальных ковариационных матриц. Показанные в таблице данные представляют СКО для каждой из

парциальных моделей. Матрица суммарной СКО в алгоритме не рассчитывается, но, учитывая то, что для определения результирующей оценки производится весовое суммирование оценок, общая ошибка оценки угла чуть хуже наименьшей ошибки парциальных фильтров. В таблице 2 приведены парциальные СКО (БФ, ОФ, ВФ) и общая СКО следящей системы (СФ) в переходном и установившемся режимах.

Табл. 2. Ошибки оценивания фазовых координат

Режим функционирования	СКО оценивания фазовых координат ($\sigma_{\varphi} \cdot 10^{-4}$ радиан)			
	БФ	ОФ	ВФ	СФ
Переходный	26.0	380.0	210.0	26.3
Установившийся	10.8	5.2	7.2	6.2

Зависимость длительности переходного процесса t , а так же СКО от величины дисперсии (мощности) шума наблюдения для каждого из парциальных фильтров приведена в таблице 3.

Табл.3. Время переходного процесса и ошибки оценивания фазовых координат

Предполагаемая мощность шума наблюдения, мВт	Время переходного процесса t , с			СКО в установившемся режиме ($\sigma_{\varphi} \cdot 10^{-4}$), °		
	БФ	ОФ	ВФ	БФ	ОФ	ВФ
0.001	0.06	0.72	0.28	43.8	1.1	4.4
0.01	0.1	1.22	0.52	80	6.3	23
0.1	0.3	2.62	0.8	200	40	120

Из таблицы 3 следует, что наименьшее время переходного процесса у быстродействующего фильтра, а наиболее высокая точность в установившемся режиме у основного фильтра. Следует еще раз подчеркнуть, что такое малое время переходного процесса и такая высокая точность обусловлены тем, что оценка потенциальных ошибок не учитывает многих реально существующих особенностей функционирования, например, таких как ошибки дискретизации и квантования, ошибки округления и ограниченной разрядности и т.п. Анализируя результаты исследования, можно сделать следующие выводы:

- все СКО фильтрации достаточно быстро (примерно за 1-3 с) сходятся от начальных значений к существенно меньшим значениям, причем наиболее быстро это происходит в быстродействующем фильтре;

- СКО угла, угловой скорости в установившемся режиме имеют постоянную величину.

Полученный алгоритм из-за большого количества перекрестных связей довольно сложен даже при двух моделях [5]. Известно, что величина невязки измерения обусловлена действием шумов измерения и степенью неточностью прогноза измерения на следующий шаг. Так как на вход в рассматриваемом случае поступает общий сигнал первичного измерителя, можно заключить, что изменение невязок измерения за счет шумов будет сходно для подсистем обеих моделей. Различаться невязки будут в основном за счет прогноза, определяемого на основе разных моделей. Это дает возможность построить упрощенный алгоритм на основе тех же двух моделей.

Как видно из рисунка 2 структурная система состоит из двух обычных линейных фильтров (Ф1, Ф2), схемы сравнения невязок, схемы выбора оценки.

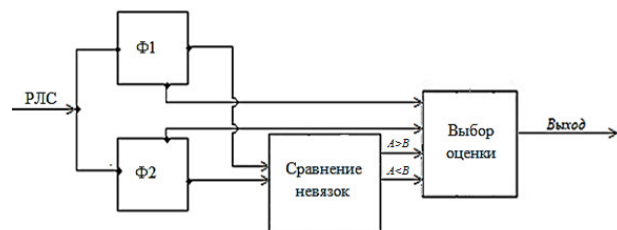


Рис. 2. Структура упрощенного алгоритма оценивания координат

На входы фильтров соответственно поступают сигналы с радара (РЛС - первичный измеритель). Сигналы с выходов фильтров 1 и 2 подаются на схему выбора оценки, которая организует логическое переключение сигналов с двух входов на один выход, что обеспечивает схема сравнения невязок. Если невязка фильтра 1 меньше невязки фильтра 2 или невязка фильтра 1 больше невязки фильтра 2 на выходе схемы сравнения невязок ($A < B$ или $A > B$ соответственно) появится высокий уровень сигнала и этот сигнал переключает входы схемы выбора оценки, в результате чего на выходе схемы выбора оценки появится выходной сигнал с фильтра 1 или фильтра 2. При действии радиопомех обе невязки увеличивается примерно одинаково. Разное изменение невязок обусловлено изменением поведения сопровождаемого объекта (например, маневрированием). Поскольку предпочтительнее выходной сигнал фильтра с минимальной невязкой, используем его, так как он имеет минимальную погрешность в измерениях. Далее полученные значения невязки с помощью компаратора перенаправляются на вход схемы сравнения, которая подключает фильтр к выходу. С помощью этого устройства можно определить координаты и обнаружить маневр воздушных объектов. На рисунке 3 представлено истинное поведение координаты $x(k)$ (кривая 1) и ее результирующая оценка $\hat{x}(k)$ синтезированной выше

и упрощенного алгоритмов (кривые 2 и 3), полученные при одинаковых условиях.

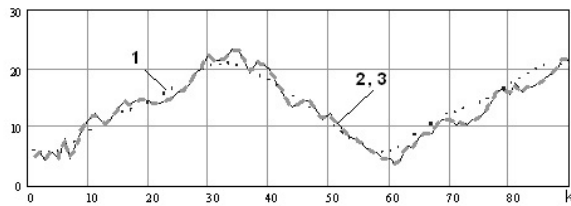


Рис. 3. Изменение истинной координаты (кривая 1) и ее оценки
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Таким образом, алгоритм, построенный на основе двух моделей методами теории систем со случайной структурой и упрощенный алгоритм, дают практически совпадающие оценки. Это обусловлено наличием моделей с различными характеристиками, учитывающих различные типы изменения оцениваемого параметра и почти точным следованием поведения сигнала либо первой модели, либо второй модели. В целом, результаты статистического моделирования демонстрируют эффективность предлагаемого алгоритма.

Такой метод построения следящей системы позволяет, не слишком усложняя систему использовать несколько фильтров, каждый из которых настроен на свою область работы.

Рассмотрим еще одну особенность функционирования упрощенной системы оценивания координат. Пусть истинное значение координаты изменяется так, как показано на рисунке 4 (кривая 1).

В течение времени от 0...20 шага координата постоянна. Присутствует только незначительное случайное изменение ее с нулевым математическим ожиданием. На участке 20...45 шагов происходит довольно резкое перемещение цели с возвратом в дальнейшем к прежнему положению, а далее (шаги 46...100) вновь происходит незначительное случайное изменение координаты с нулевым математическим ожиданием.

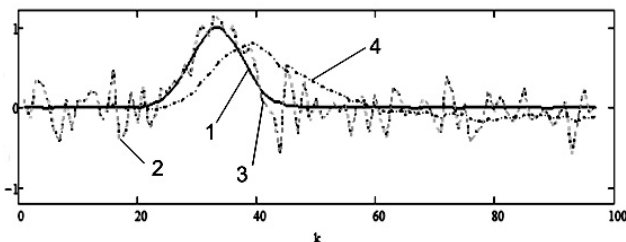


Рис. 4. Изменение координат

На рисунке 4 показано кроме того измеренное первичным измерителем значение координаты (кривая 2), а также оценки ее с выходов первого (широкополосного) фильтра (кривая 3) и второго (узкополосного) фильтра (кривая 4).

Видно, что при резком изменении угла (шаги 20...45) у второго фильтра появляется значительная

динамическая ошибка, но при этом он практически не реагирует на шум наблюдения.

В то же время широкополосный фильтр динамической ошибки практически не имеет, но он сильно реагирует на шумовую составляющую.

На рисунке 5 показана ошибка первого (кривая 1), второго (кривая 2) фильтров и ошибка с выхода мультиплексора предлагаемого объединенного фильтра (кривая 3).

Из рисунка видно, что в некоторые моменты времени (область А) мультиплексор выдает на выход оценку не с наименьшей, а с наибольшей ошибкой. Это происходит потому, что величина невязки и величина ошибки хотя и зависимы, но не совпадают полностью.

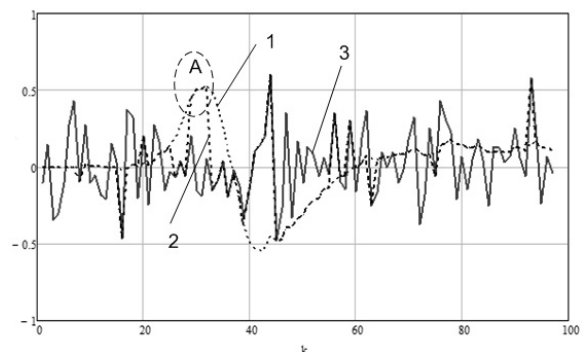


Рис. 5. Кривая 1 – ошибка первого фильтра; кривая 2 – ошибка второго фильтра; кривая 3 – ошибка с выхода объединенного фильтра.

Для снижения резких случайных изменений величины невязки возможно применение сглаживания.

Было проведено моделирование работы вышеупомянутых фильтров со сглаживанием невязки с помощью разных фильтра низкой частоты.

В частности, при сглаживании посредством цифрового фильтра нижних частот Баттерворта третьего порядка.

Кроме невязок фильтров первого и (кривые 1 и 2, соответственно), на рисунке 6 показана работа мультиплексора (кривая 3). При высоком уровне на выход мультиплексора поступает оценка первого фильтра, при низком – второго фильтра.

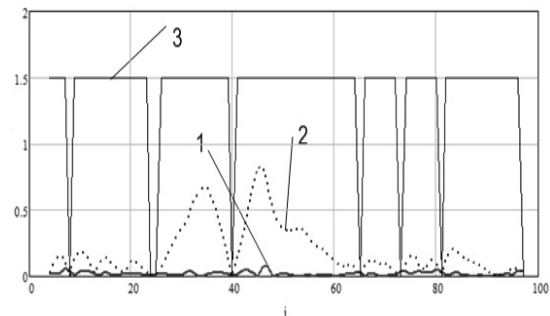


Рис. 6. Кривая 1 – невязка первого фильтра; кривая 2 – невязка второго фильтра; кривая 3 – работа мультиплексора

Из рисунка 6 видно, что переключения здесь происходят реже, так как они в основном связаны с изменением динамической составляющей ошибки. Среднеквадратическая величина ошибки при этом для типовых условий работы снижается на 10...15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, моделирование показало, что упрощенный алгоритм дает оценки с ошибкой незначительно большей, в сравнении с оптимальным реконфигурируемым алгоритмом, синтезированным на основе теории систем со случайным скачкообразным изменением структуры (таблица 1). При этом структура упрощенного алгоритма значительно проще, даже при трех и четырех моделях. В целом, результаты имитационного моделирования показали эффективность предлагаемого подхода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pudovkin, A. P., Panasyuk, Yu N., Danilov, S. N., Moskvitin, S. P. Synthesis of Algorithm for Range Measurement Equipment to Track Maneuvering Aircraft Using Data on Its Dynamic and Kinematic Parameters. – Journal of Physics: Conference Series, Volume 1015, Issue 3, article id. 032111 (2018).

2. Pudovkin, A. P., Panasyuk, Yu N., Danilov, S. N., Moskvitin, S. P. Synthesis of channel tracking for random process parameters under discontinuous variation. – Journal of Physics: Conference Series, Volume 1015, Issue 3, article id. 032112 (2018).

3. Данилов, С. Н. Алгоритм функционирования системы угловой коррекции наземной подвижной антенны, синтезированный на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С. 55 – 59.

4. Бухалев В.А. Основы автоматики и теории управления. – М.: ВВИА, 2006. – 408 с.

5. Панасюк, Ю.Н. Алгоритм дальномерного канала с учетом информации бортовых датчиков воздушных судов / Ю.Н. Панасюк, А.П. Пудовкин, И. В. Князев // Радиотехника. – 2013. – № 9. – С 60 – 63.

Данилов Станислав Николаевич, доктор технических наук, профессор, plabz@mail.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет

Пудовкин Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, arridovkin.tstu@mail.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет

Панасюк Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ruynikol@mail.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Беляев Павел Серафимович, доктор технических наук, профессор, bps800@yandex.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Варепо Лариса Григорьевна, доктор технических наук, профессор, larisavarepo@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Наимов Умеджон Розибекевич, аспирант, umed87-88@mail.ru, Россия, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет,

Беляев Максим Павлович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», belyaev_mp@mail.ru

RECONFIGURABLE TRACKING CHANNEL OF RANDOM PROCESS PARAMETERS VARIATED IN DISCRETE STEPS

S.N. Danilov¹, A.P. Pudovkin¹, Yu.N. Panasyuk¹, P.S. Belyaev¹, L.G. Varepo², U.R. Naimov¹,
M.P. Belyaev³

¹ Tambov State Technical University (TSTU), Tambov,

² Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk

³ Research department, Military Training and Scientific Center of the Air Force "The Zhukovsky - Gagarin Air Force Academy", Voronezh

With the purpose of such maneuvering objects tracking as aircrafts, low-Earth-orbit constellation and etc., the problem of the functioning algorithms synthesis for meters, operated in condition of variated in discrete steps coordinates and their derivatives is set. The problem is solved by reconfigurable tracking meters synthesis with variable both parameters and structure depending on the situation. The reconfigurable functioning algorithm of the measuring system and its simplified version were developed with relation to the selected method. The created channel structure consists of double linear filters, comparison scheme and estimation selection scheme. It was shown the simplified algorithm version with switching within the tolerances is adequate to the optimal algorithm.

Keywords: measuring system, simulation modelling, reconfigurable algorithm, simplified algorithm of the coordinate estimation

REFERENCES

1. Pudovkin A P, Panasyuk Yu N, Danilov S N, Moskvitin S P, 2018 *Journal of Physics: Conference Series* 1015(3) 032111.
2. Pudovkin A P, Panasyuk Yu N, Danilo, S N, Moskvitin S P, 2018 *Journal of Physics: Conference Series*,1015(3). 032112
3. Danilov S N, Pudovkin A P, Panasyuk Yu N, 2013 *Radiotekhnika* 9 55-59
4. Bukhalev V.A. Fundamentals of automation and control theory. - . Moscow: VVIA, 2006
5. Panasyuk Yu N, Pudovkin A P, Danilov S N and Knyazev I V, 2013 *Radiotekhnika* 9 60–63

Danilov Stanislav Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, plabz@mail.ru. Russia, Tambov, Tambov State Technical University,

Pudovkin Anatoly Petrovich, doctor of technical sciences, professor, appudovkin.tstu@mail.ru. Russia, Tambov, Tambov State Technical University,

Panasyuk Yuri Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor, pyunikol@mail.ru Russia, Tambov, Tambov State Technical University,

Belyaev Pavel Serafimovich, doctor of technical science, professor, bps800@yandex.ru. Russia, Tambov, Tambov State Technical University

Varepo Larisa Grigorievna, doctor of technical science, professor, larisavarepo@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Naimov Umejon Rozibekovich, graduate student, ymed87-88@mail.ru. Russia, Tambov, Tambov State Technical University,

Belyaev Maksim Pavlovich – Ph.D. of technical science, belyaev_mp@mail.ru, head of research department, Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin