

УДК 004.7

**Моделирование трафика, передаваемого
в канале управления летательным аппаратом при
управлении им в процессе выполнения специальных задач.
Часть 2. Экстраполяция и прогнозирование интенсивности
нестационарного трафика**

Иванов М. С., Понаморов А. В., Макаренко С. И.

***Актуальность.** В начале XXI века интенсивность применения Военно-воздушных сил значительно возросла. Одновременно с возрастанием интенсивности применения авиации выявляются проблемные технические аспекты ее эксплуатации и управления. Одним из таких аспектов является несоответствие принципов организации связи в сетях воздушной радиосвязи (СВРС) управления ЛА авиации специального назначения (СН) высоким требованиям по оперативности управления ЛА, своевременности передачи данных и команд на борт ЛА, скорости передачи, как отдельных каналов управления, так и СВРС, в целом. В частности, в СВРС используется директивный способ назначения частотно-временных ресурсов для отдельных каналов управления ЛА в СВРС, что не позволяет адаптивно распределять частотно-временные ресурсы СВРС. Предварительные исследования показали, что подобное назначение ресурсов для каналов управления ЛА в СВРС не учитывает изменения интенсивности передаваемого по ним трафика (команд и данных о воздушной обстановке (ВО)) на различных этапах полета ЛА и характера выполняемых ими задач, что ведет к снижению своевременности передачи команд управления ЛА и как следствие – к снижению эффективности управления ЛА. В связи с этим целесообразно распределять частотно-временные ресурсы СВРС с учетом прогнозируемой интенсивности трафика в каналах управления. **Целью статьи является** экстраполяция интенсивности нестационарного потока трафика в канале управления ЛА на следующий цикл управления для последующего адаптивного планирования и распределения частотно-временного ресурса СВРС. **Новизна.** К элементам, определяющим научную новизну исследования относится то, что для экстраполяции нестационарного трафика используется метод наименьших квадратов, учитываются реальные статистические данные об интенсивности трафика в канале управления ЛА на каждом цикле, а также ошибки аппроксимации. **Практическая значимость работы** состоит в том, что разработанные теоритические решения по аппроксимации нестационарного трафика в канале управления ЛА могут использоваться для решения задач повышения скорости передачи данных в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотно-временного ресурса сети при наведении ЛА на воздушную цель.*

***Ключевые слова:** сеть воздушной радиосвязи, авиация, организация связи, военная авиация, управление летательными аппаратами.*

Введение

В настоящее время стремительно возрастает роль авиации специального назначения (СН) для решения широкого спектра задач в сфере обороны страны,

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов М. С., Понаморов А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 2. Экстраполяция и прогнозирование интенсивности нестационарного трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 148-172. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-148-172.

Reference for citation:

Ivanov M. S., Ponomarev A. V., Makarenko S. I. Simulation of the teletraffic that transmitted in a radio channel of control combat aircraft. Part 2. Extrapolation and forecasting of the intensity of non-stationary traffic. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 6, pp. 148-172 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-148-172.

обеспечения государственной безопасности, охраны правопорядка, предотвращения терактов, техногенных катастроф и стихийных бедствий. Авиационные подразделения, оснащенные соответствующими летательными аппаратами (ЛА), имеют в своем составе: Пограничная служба Федеральной службы безопасности (ПС ФСБ), Министерство по чрезвычайным ситуациям (МЧС), Министерство внутренних дел (МВД), Войска национальной гвардии (Росгвардии), Министерство обороны (МО). Одной из основных задач при применении авиации СН является наведение ЛА (как пилотируемых, так и беспилотных) на воздушные цели. Необходимость в таком наведении возникает при выполнении следующих целевых задач (ЦЗ):

- перехвате ЛА – нарушителей государственной границы и воздушного пространства Российской Федерации (РФ) (задача авиации ПС ФСБ и истребительной авиации МО);
- вывод спасательных ЛА в район воздушных судов, терпящих бедствие (задача авиации МЧС);
- перехват ЛА – нарушителей правил организации воздушного движения, а также ЛА захваченных и используемых незаконными вооруженными формированиями (НВФ), либо террористами (задача авиации Росгвардии и МВД).

Анализ процессов управления ЛА при решения типовых задач авиации СН представленный в работах [1-12] показал, что сеть воздушной радиосвязи (СВРС) является основным средством для управления одиночными и групповыми действиями ЛА, посредством которой и осуществляется передача команд с пункта управления (ПУ) на борт ЛА, решение задач траекторного управления и информационного обеспечения.

Как показано в 1-й части данного исследования [10] интенсивность трафика (команд и данных о воздушной обстановке (ВО)) в канале управления ЛА при его командном наведении различна – на этапах полета в зону выполнения ЦЗ интенсивность может быть невысокой, однако она значительно возрастает на этапах непосредственного наведения ЛА на цель, особенно в условиях сложной ВО. Таким образом, трафик в канале управления ЛА имеет нестационарный характер, что не учитывается в современных технических средствах СВРС которые спроектированы с учетом стационарного трафика в канале управления ЛА. Отсутствие учета нестационарного характера трафика в канале управления ЛА ведет к появлению неучтенной задержки передачи команд и данных в СВРС на наиболее важных этапах полета ЛА (полет ЛА в/из район(а) выполнения ЦЗ; непосредственное наведение ЛА на цель и управление решением ЦЗ; постановка новой ЦЗ), что негативно влияет на выполнение ЦЗ в целом [20, 21]. Разрешением вышеуказанной проблемной ситуации является повышение скорости передачи данных в СВРС за счет внедрения адаптивного распределения частотно-временного ресурса СВРС по отдельным каналам управления ЛА в зависимости от интенсивности передаваемого по ним трафика.

В 1-й части данного исследования [10] представлена аналитическая модель изменения интенсивности трафика в канале управления ЛА по различным этапам полета. Доказано, что реальный трафик в канале управления ЛА, имеет

нестационарную природу. Вместе с тем, методы, позволяющие учитывать нестационарную составляющую трафика, либо достаточно громоздки, либо не разработаны для конкретных моделей информационных сетей, в том числе и СВРС управления ЛА. В таких условиях необходимо либо разработка новых подходов к учету нестационарной составляющей трафика, либо применение численных методов оценки интенсивности нестационарного трафика и в дальнейшем провести «коррекцию» уже разработанных моделей СВРС и способов распределения его частотно-временного ресурса. В рамках данной работы предполагается использование второго подхода к учету нестационарной составляющей трафика в канале управления ЛА. Предлагается использование существующей модели системы массового обслуживания (СМО) для СВРС на основе алгоритм случайного многостанционного доступа (АСМСД) [13] с коррекцией ее показателей с учетом нестационарной составляющей трафика в каналах управления ЛА.

Экстраполяции трафика, передаваемого по каналам управления летательным аппаратом. Постановка частной задачи на экстраполяцию

Как показано в 1-й части данного исследования [10] в общем виде входной поток $\lambda(t)$ в канал управления ЛА имеет в своем составе две сопоставимые по уровню составляющие – нестационарную $\lambda_{var}(t)$ и стационарную $\lambda_{det}(t)$. Оценка нестационарной составляющей на циклических этапах управления ЛА даст возможность свести нестационарный входной поток к набору стационарных значений внутри каждого из циклов управления $T_{ц}$ на различных этапах полета ЛА. При этом граничные условия значений интенсивности $\lambda(t)$ при переходе от $i-1$ цикла управления к i -му в момент t_i будут определяться следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow (t_i-0)} \lambda(t) - \lim_{t \rightarrow (t_i+0)} \lambda(t) = \Delta\lambda(t_i); \\ \Delta\lambda(t_i) = \Delta\lambda_{det}(t_i) + \Delta\lambda_{var}(t_i); \\ \Delta\lambda_{det}(t_i) = const; \\ \Delta\lambda_{var}(t_i) \neq const. \end{cases} \quad (1)$$

Применение методов экстраполяции позволит произвести оценивание интенсивности трафика в канале управления ЛА и соответственно спрогнозировать ее интенсивность на следующем цикле управления. На основе данного прогноза в дальнейшем будет вычисляться необходимая скорость передачи в канале управления ЛА. Кроме точечной оценки прогнозируемого значения интенсивности трафика в канале управления ЛА необходимо учесть ошибки, связанные с разбросом оцениваемых значений и собственными погрешностями метода экстраполяции. Общий вид процесса оценивания и экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА отображен на рис. 1.

Экстраполяция и последующее формирование на основе экстраполированных значений требований к скоростям передачи данных в каналах управления ЛА должно, на первый взгляд, привести к формированию новых требований к тактико-техническим характеристикам (ТТХ) каналобразующей аппара-

туры СВРС. Однако проведенные исследования показали, что это не так – возможно повышение скоростей передачи отдельных каналов управления ЛА на этапах полета с высокой интенсивностью информационного обмена за счет снижения скоростей передачи других каналов управления, которые соответствуют этапам полета ЛА с низкой интенсивностью информационного обмена. В связи с этим, отсутствует необходимость изменять требования к ресурсам по пропускной способности СВРС в целом.

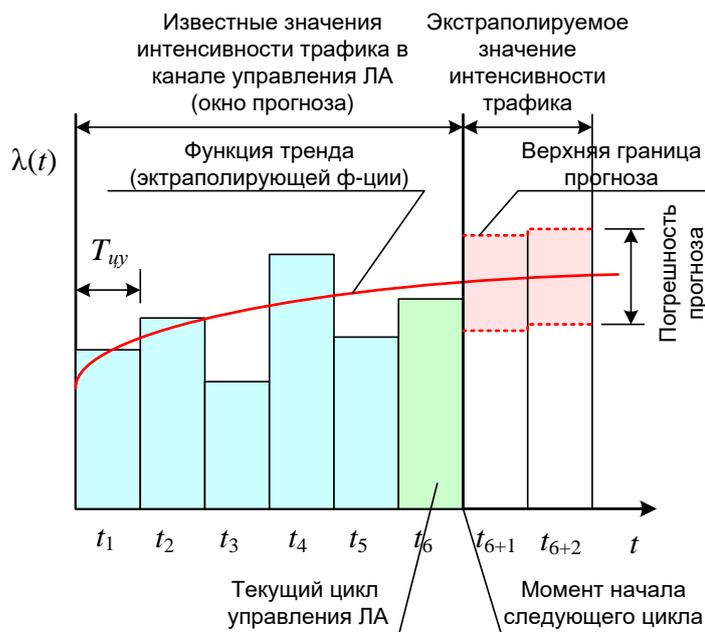


Рис. 1. Процесс оценивания и экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА

Экстраполяция и последующее формирование на основе экстраполированных значений требований к скоростям передачи данных в каналах управления ЛА должно, на первый взгляд, привести к формированию новых требований к тактико-техническим характеристикам (ТТХ) каналообразующей аппаратуры СВРС. Однако проведенные исследования показали, что это не так – возможно повышение скоростей передачи отдельных каналов управления ЛА на этапах полета с высокой интенсивностью информационного обмена за счет снижения скоростей передачи других каналов управления, которые соответствуют этапам полета ЛА с низкой интенсивностью информационного обмена. В связи с этим, отсутствует необходимость изменять требования к ресурсам по пропускной способности СВРС в целом.

В [14] проведены результаты оценки вероятности превышения и принижения интенсивности трафика в канале управления ЛА над средним значением по этапам полета ЛА. Результаты моделирования показали, что в СВРС имеется дополнительный ресурс, за счет рационального использования которого возможна «коррекция» избыточной скорости тех каналов управления, которые ее используют не в полной мере, и перераспределения этого ресурса СВРС в пользу каналов управления ЛА, в которых передается трафик с высокой интенсивностью. После решения задачи экстраполяции интенсивности трафика в каж-

дом канале управления ЛА возможно перераспределение скоростей отдельных каналов управления в интересах их адаптации к прогнозируемой интенсивности трафика.

Таким образом, для решения задачи адаптации распределения ресурсов СВРС к нестационарным потокам трафика в каналах управления ЛА необходимо решить задачу экстраполяции трафика передаваемого по каналам управления ЛА.

Выбор метода решения задачи экстраполяции

Задача прогнозирования значения параметра по известной выборке значений этого параметра в математической постановке представляется последовательным решением задач аппроксимации и экстраполяции.

В данном случае задача прогнозирования может решаться как полиномиальными, так и регрессионными методами. Был проведен анализ интерполяционных полиномиальных [15, 16] и регрессионных методов [17, 18]. Анализ методов проводился по следующим критериям: наименьшей ошибки при последующем решении задачи экстраполяции; наличие методически разработанного аппарата оценки ошибок прогноза; сходимость функции прогноза за пределами базовой выборки.

В качестве регрессионных моделей рассматривались модели, полученные методом наименьших квадратов для степенной, линейной, параболической и гиперболической функций [17, 18]. В качестве интерполяционных моделей рассматривались полином Ньютона, Лагранжа и Чебышева [15, 16]. Наличие изначальной возможности применения регрессионных моделей для решения задач аппроксимации, методически разработанный аппарат оценки ошибок экстраполяции для регрессионных моделей и необходимость дополнительной проверки полиномиальных моделей на расхождение за пределами базовой выборки позволяет сделать вывод о том, что для решения задачи экстраполяции нестационарной составляющей нестационарного трафика в каналах управления ЛА в СВРС целесообразно использование регрессионных моделей прогнозирования.

Анализ основных типов регрессионных моделей (рис. 2) на предмет их соответствия априорным данным о границах изменения интенсивности трафика в канале управления ЛА в зависимости от продолжительности полета позволяет сделать вывод о возможности использования в интересах решения задачи экстраполяции интенсивности трафика полиномиальной и линейной моделей. Особенностью использования данных моделей в случае экстраполяции оценок интенсивности трафика в канале ЛА является то, что экстраполируемая величина, возможно, не является случайной. В этом случае необходимо использование метода наименьших квадратов к детерминированным значениям оценок интенсивности трафика с целью получения экстраполирующих уравнений соответствующего типа.

Применение регрессионных моделей оправданно высокой корреляцией значений интенсивности трафика в канале управления ЛА при переходе от одного цикла управления ЛА к другому. Данная корреляция обусловлена не только постоянной составляющей информационного обмена (команды наведения с

ПУ), но и невозможностью мгновенного изменения нестационарной составляющей информационного обмена, ввиду невозможности кардинального изменения воздушной обстановки на масштабах времени 1-10 с.



Рис. 2. Результаты анализа основных типов регрессионных моделей на предмет их соответствия априорным данным о границах изменения интенсивности трафика в канале управления ЛА

Таким образом, для решения задачи экстраполяции нестационарной составляющей трафика в канале управления ЛА целесообразно использование полиномиальной и линейной моделей ввиду их максимального соответствия априорным данным о границах интенсивности информационного обмена между ПУ и ЛА и наличие методически разработанного аппарата оценки ошибок экстраполяции.

Определение типа используемой экстраполирующей функции

При анализе статистических данных о мгновенных оценках интенсивности трафика λ в канале управления ЛА необходимо принять решение о виде экстраполирующей функции которая в дальнейшем будет использована при оценки и экстраполяции динамического изменения λ . В предыдущем подразделе было обоснованно использование для экстраполяции линейной и параболической функции. Выбор между этими двумя типами функций обусловлен возможностью представления статистических данных о мгновенных оценках интенсивности трафика λ в общем случае параболической функцией. Однако, если ускоряющаяся составляющая параболической функции стремиться к нулю возможна замена параболической функции – линейной, без существенной потери

точности [19]. Необходимость такой замены обусловлена, значительно более низкими требованиями к вычислительным ресурсам средства связи при расчете параметров линейной экстраполирующей функции по сравнению с расчетом параметров параболической экстраполирующей функции.

Оценка возможности замены параболической экстраполирующей функции линейной определяется на основании анализа статистических данных об оценках интенсивности трафика λ в канале управления ЛА в случае несущественности различий цепных абсолютных изменений. Первоначально производится усреднение статистических данных за m наблюдений [19]:

$$\lambda_{cp\ m} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \lambda_i. \quad (2)$$

После чего производится оценка цепного прироста $\Delta\lambda_i$ для каждого из m наблюдений:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_{cp\ i+1} - \lambda_{cp\ i}. \quad (3)$$

При этом весь объем собранных статистических данных разбивается на два примерно равные подпериода n_1 и n_2 . Для каждого из этих подпериодов вычисляются [19]:

– среднее статистическое $\Delta\lambda_{cp\ j}$:

$$\Delta\lambda_{cp\ j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta\lambda_i; \quad j=1,2; \quad (4)$$

– среднее квадратичное отклонение (СКО) $S_{\Delta\lambda_j}$ как оценка генерального СКО с учетом потери одной степени свободы вариации:

$$\sigma_{\Delta\lambda_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\lambda_i - \Delta\lambda_{cp\ j})^2}{n_j - 1}}; \quad j=1,2; \quad (5)$$

– средняя ошибка оценивания интенсивности $\delta_{\lambda,j}$:

$$\delta_{\lambda,j} = \frac{\sigma_{\Delta\lambda_j}}{\sqrt{n_j}}; \quad j=1,2. \quad (6)$$

Для проверки несущественности различий цепных абсолютных изменений $\Delta\lambda$ в подпериодах n_1 и n_2 необходимо проверить существенность их различий попарно по t -критерию Стьюдента (возможна проверка всех различий сразу по критерию Фишера) [19]. Для этого, определяется средняя случайная ошибка разностей двух выборочных средних оценок $\delta_{\lambda,\Delta j}$:

$$\delta_{\lambda,\Delta j} = \sqrt{\delta_{\lambda,1}^2 - \delta_{\lambda,2}^2}, \quad (7)$$

а на ее основании вычисляется критерий Стьюдента t_{stud} существенности различия 2-ух подпериодов цепных приростов [19]:

$$t_{stud} = \frac{\Delta\lambda_{cp\ 1} - \Delta\lambda_{cp\ 2}}{\sqrt{\delta_{\lambda,1}^2 - \delta_{\lambda,2}^2}}. \quad (8)$$

Для вычисления критического значения t -критерия Стьюдента необходимо выбрать доверительную вероятность β правильного определения типа экстраполирующей функции. На основании выбранного значения β определяется

критическое значение t -критерия Стьюдента $t_{stud\ krit}$ при доверительной вероятности β и N степенях свободы [19]:

$$2 \int_0^{t_{stud\ krit}} S_N(t) dt = \beta, \quad (9)$$

где N из (9) определяется как: $N = (n_1 - 1) + (n_2 - 1)$.

Критерием принятия решения о несущественности различий цепных абсолютных изменений и соответственно возможности использования для описания статистических оценок λ линейной экстраполирующей функции служит условие из (8) и (9):

$$t_{stud} \ll t_{stud\ krit}, \quad (10)$$

означающие, что различие средних приростов в разные периоды случайно с вероятностью $1 - \beta$.

Общая последовательность действий при принятии решения о типе экстраполирующей функции представлена на рис. 3.

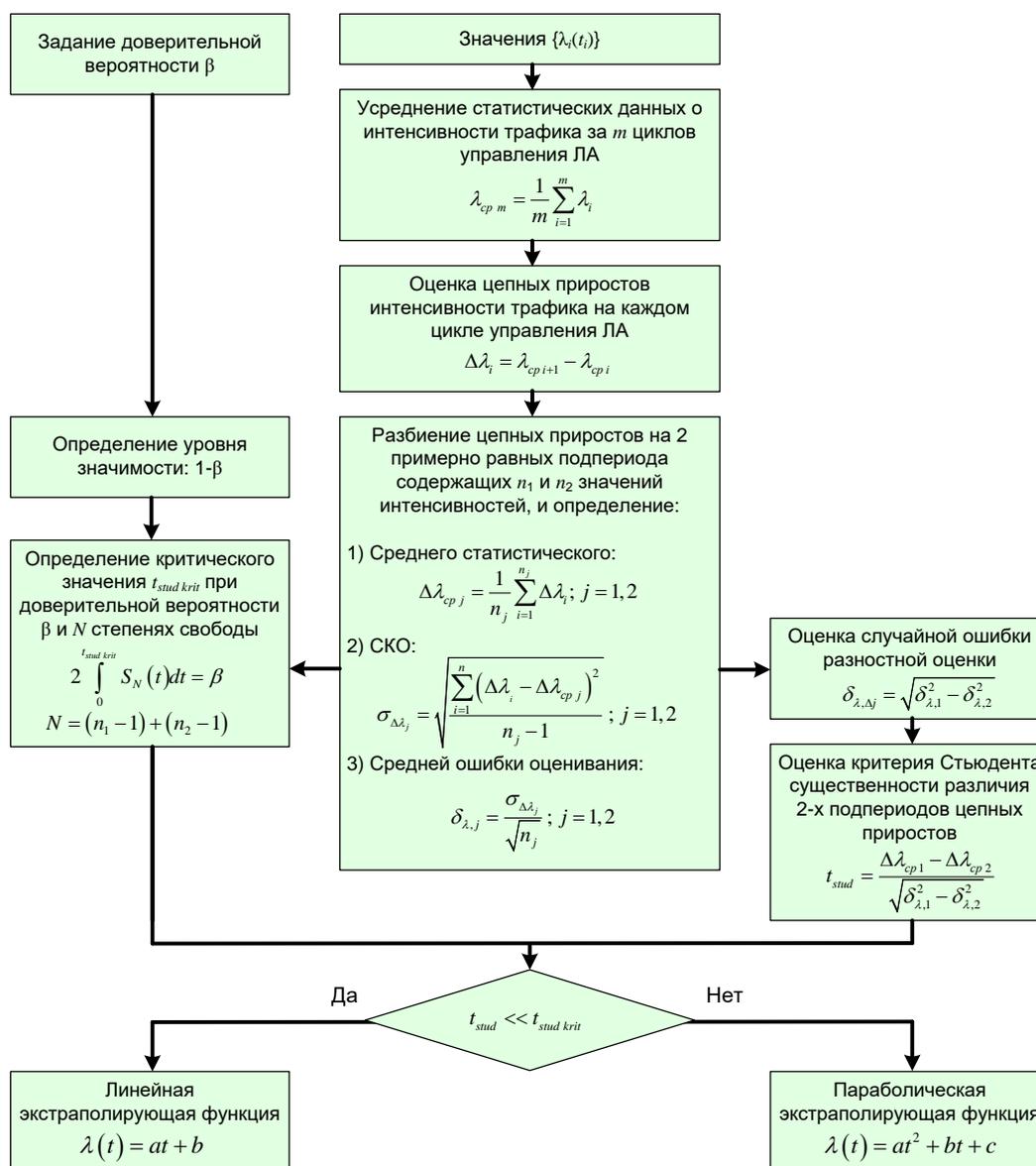


Рис. 3. Схема принятия решения о типе экстраполирующей функции

Таким образом, условие (10) определяет тип функции, которое в дальнейшем используется для экстраполяции оценок интенсивности трафика в канале управления ЛА. При выполнении условия (10) для экстраполяции статистических оценок λ используется линейная, а при невыполнении – параболическая функция экстраполяции.

Определение параметров линейной экстраполирующей функции

При известном типе аппроксимирующего уравнения необходимо вычислить параметры используемого уравнения. Для этого используется метод наименьших квадратов (МНК) состоящий в минимизации суммы квадратов отклонений фактических значений интенсивности $\lambda_i(t_i)$ от значений искомого уравнения $\lambda(t)$. Для линейной функции вида:

$$\lambda(t) = at + b, \quad (11)$$

применение МНК дает следующую систему нормальных уравнений:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n t_i + nb = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \\ a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i; \end{cases} \quad (12)$$

где: n – число значений оценки интенсивности λ ; t_i – время (номер) цикла управления ЛА; λ_i – значение оценки интенсивности на цикле управления ЛА на интервале времени t_i .

Упрощение данной системы производится путем переноса начала отсчета времени t_i в середину ряда. Тогда $\sum t_i$ (как суммы всех нечетных степеней t_i) будет равна нулю и система сведется к:

$$\begin{cases} nb = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \\ a \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i; \end{cases} \quad \text{для } t_i \in \left[-\frac{n-1}{2}; \frac{n-1}{2} \right].$$

Откуда:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad \text{и} \quad b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (13)$$

В теории математической статистики [19] доказывается, что:

$$\sum_{i=1}^n t_i^2 = \frac{n^3 - n}{12}. \quad (14)$$

Тогда окончательное решение для линейного аппроксимирующего уравнения (11) с учетом (13) и (14) будет иметь вид:

$$\lambda(t) = \left(\frac{12}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i \right) t + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (15)$$

Таким образом, уравнение (15) определяет аппроксимирующую функцию $\lambda(t)$ при известных n значениях оценок интенсивности трафика λ_i в моменты времени t_i в случае выполнении условия (10).

Общая последовательность нахождения решения для линейной регрессионной экстраполирующей функции представлено на рис. 4.

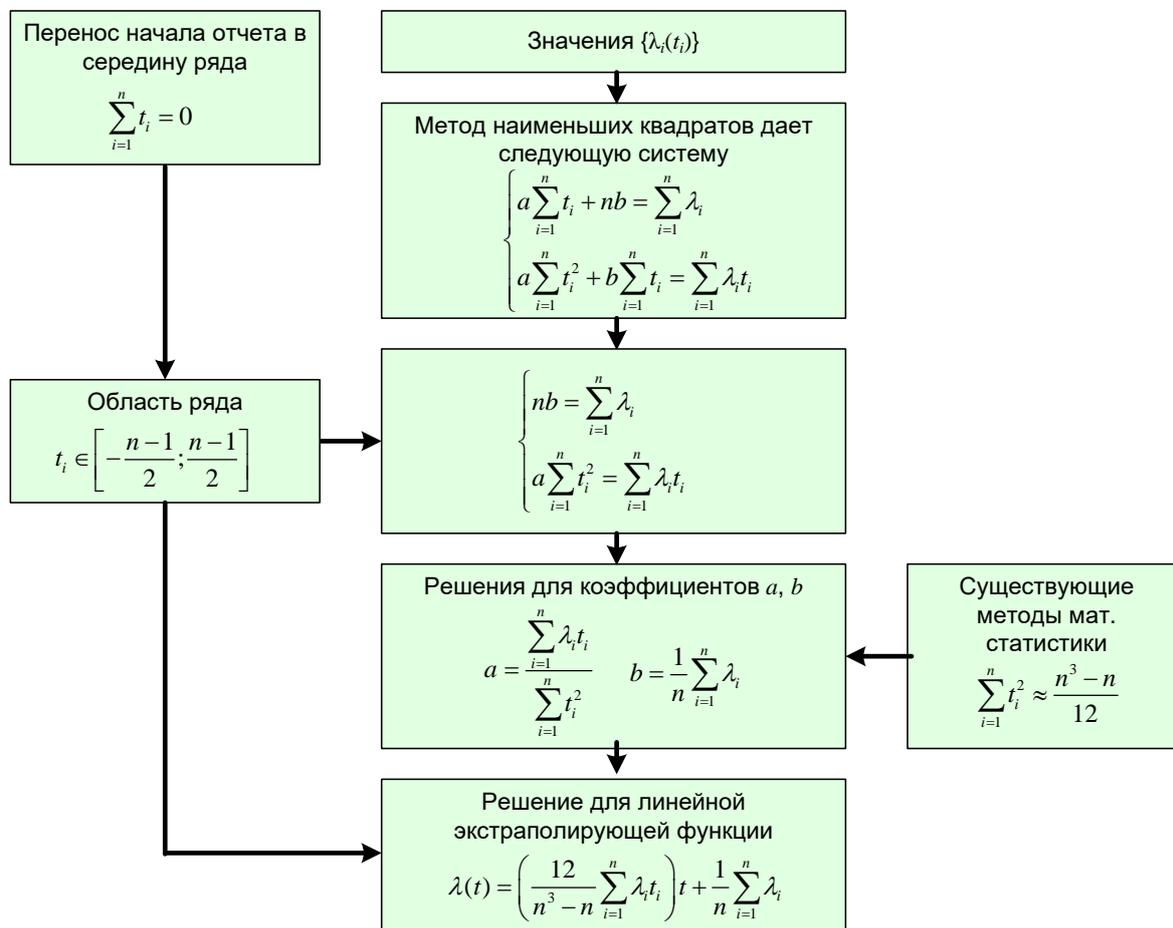


Рис. 4. Схема нахождения решения для линейной экстраполирующей функции

Определение параметров параболической экстраполирующей функции

Получим значения параметров для параболической экстраполирующей функции вида:

$$\lambda(t) = at^2 + bt + c. \tag{16}$$

Применение МНК дает следующую систему нормальных уравнений:

$$\begin{cases} nc + b \sum_{i=1}^n t_i + a \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i; \\ c \sum_{i=1}^n t_i + b \sum_{i=1}^n t_i^2 + a \sum_{i=1}^n t_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i t_i; \\ c \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i^3 + a \sum_{i=1}^n t_i^4 = \sum_{i=1}^n y_i t_i^2; \end{cases} \tag{17}$$

где: n – число значений оценки интенсивности λ ; t_i – номер (момента времени) цикла управления ЛА; λ_i – значение оценки интенсивности трафика в канале управления ЛА на цикле t_i .

Упрощение данной системы так же производится путем переноса начала отсчета времени t_i в середину ряда. Тогда $\sum t_i$ (а также суммы всех нечетных степеней t_i) будет равна нулю и система сведется к:

$$\begin{cases} nc + a \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \\ b \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i; \\ c \sum_{i=1}^n t_i^2 + a \sum_{i=1}^n t_i^4 = \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2; \end{cases} \quad \text{ДЛЯ } t_i \in \left[-\frac{n-1}{2}; \frac{n-1}{2} \right].$$

Откуда:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i^2 \right)}{n \sum_{i=1}^n t_i^4 - \left(\sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^2}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2}$$

$$c = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 \left(n \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 \right)}{n \sum_{i=1}^n t_i^4 - \left(\sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^2} \right). \quad (18)$$

В теории математической статистики [19] доказывается, что:

$$\sum_{i=1}^n t_i^2 \approx \frac{n^3 - n}{12} \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^n t_i^4 \approx \frac{3n^5 - 10n^3 + 7n}{240}. \quad (19)$$

С учетом (19) решения для параметров параболического аппроксимирующего уравнения будут иметь вид:

$$a = \frac{15}{n^5 - 5n^3 + 4n} \left(12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 + (1 - n^2) \sum_{i=1}^n \lambda_i \right), \quad b = \frac{12}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i,$$

$$c = \frac{1}{4n(n^2 - 1)} \left((9n^2 - 21) \sum_{i=1}^n \lambda_i - 60 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 \right). \quad (20)$$

Окончательно, с учетом (19) и (20), параболическое аппроксимирующее уравнение (16) будет иметь вид:

$$\lambda(t) = \frac{15t^2}{n^5 - 5n^3 + 4n} \left(12 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 + (1 - n^2) \sum_{i=1}^n \lambda_i \right) + \frac{12t}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i +$$

$$+ \frac{1}{4n(n^2 - 1)} \left((9n^2 - 21) \sum_{i=1}^n \lambda_i - 60 \sum_{i=1}^n \lambda_i t_i^2 \right). \quad (21)$$

Уравнение (21) определяет аппроксимирующую функцию параболического типа $\lambda(t)$ при известных n значениях λ_i в моменты времени t_i в случае невыполнения условия (10).

Общая последовательность нахождения решения для параболической экстраполирующей функции представлено на рис. 5.

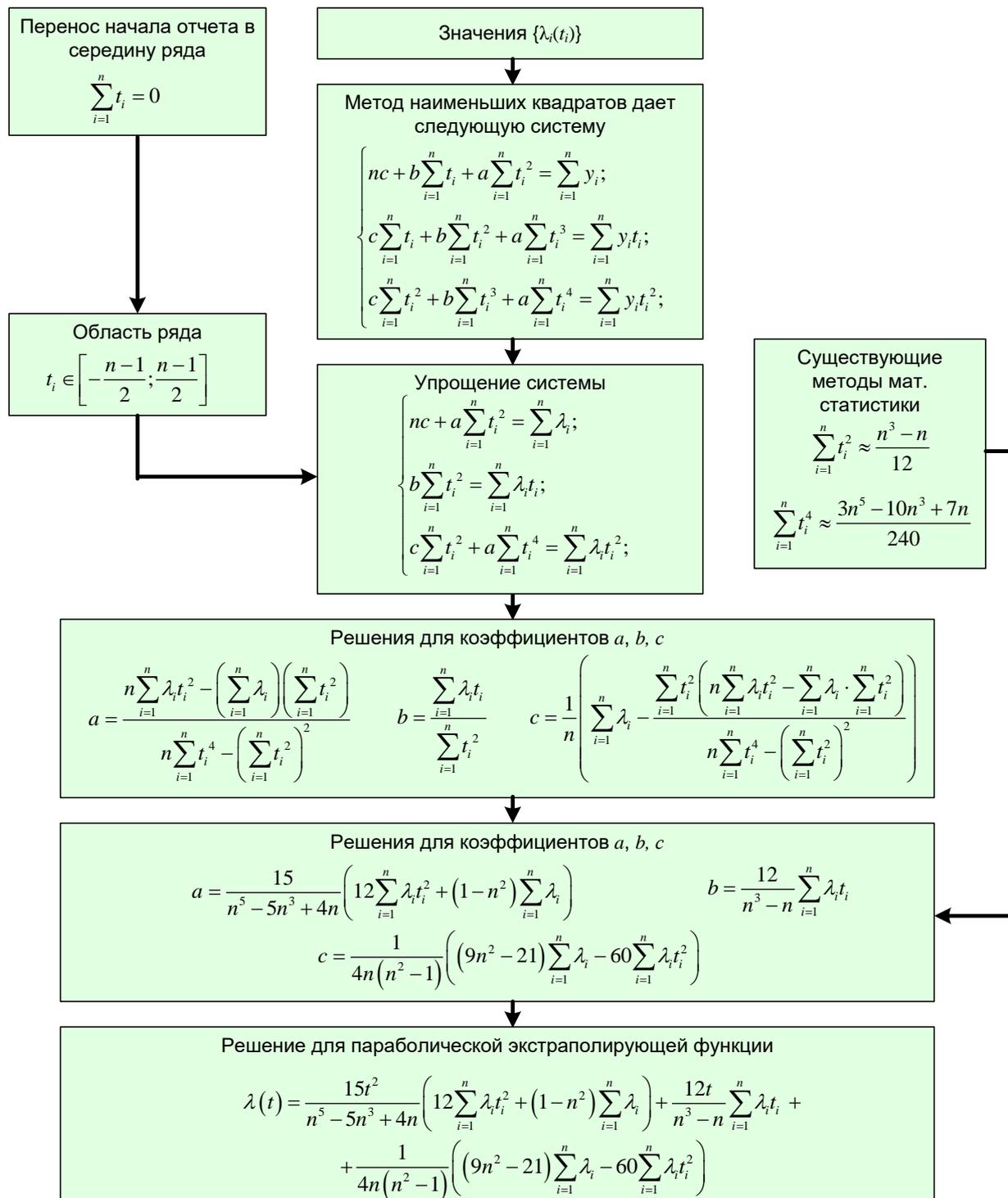


Рис. 5. Схема нахождения решения для параболической экстраполирующей функции

Проверка адекватности функции экстраполяции интенсивности трафика

После получения аналитических зависимостей (14) и (21) для аппроксимации интенсивности информационного потока λ необходима их проверка на адекватность. Адекватность аналитических зависимостей (14) и (21) статисти-

ческим данным об предыдущих оценках интенсивности трафика λ в канале управления ЛА проверяется по интегральному критерию, включающему в себя:

- коэффициент детерминации;
- коэффициент устойчивости;
- оценку средней ошибки экстраполяции.

Последовательность проверки адекватности сформированных экстраполирующих функций $\lambda(t)$ статистическим данным об интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$ на предыдущих циклах управления представлена на рис. 6.

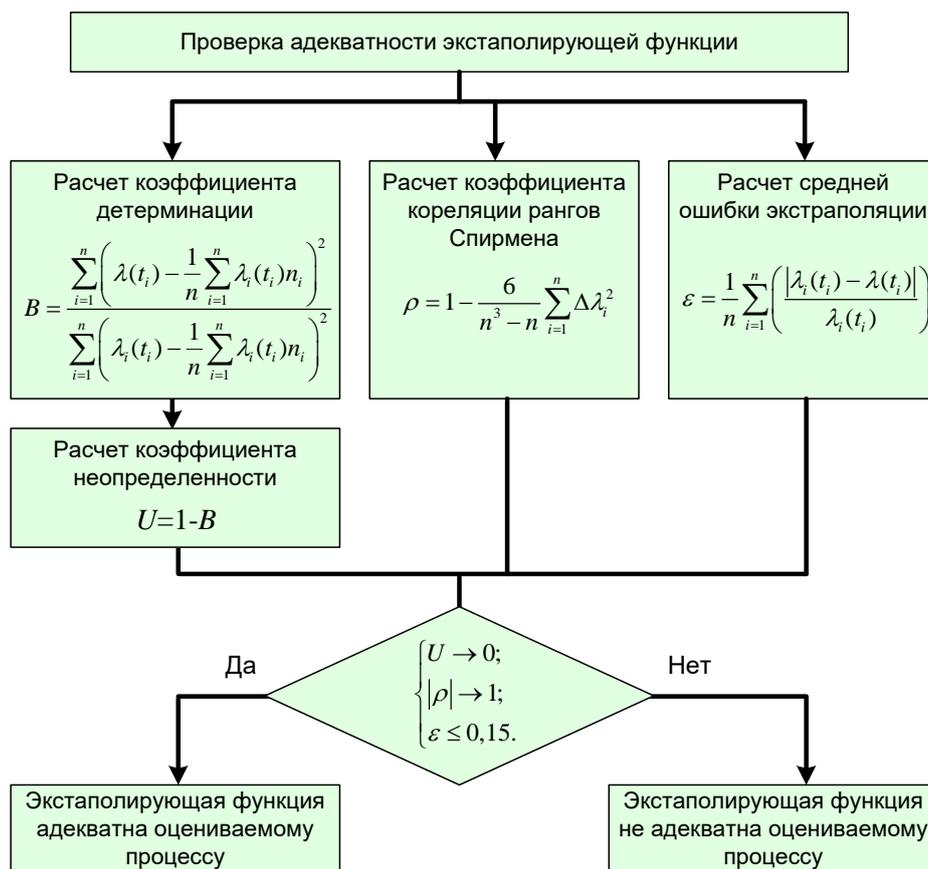


Рис. 6. Последовательность проверки адекватности сформированных экстраполирующих функций $\lambda(t)$ статистическим данным об интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$

Коэффициент детерминации B применяется для измерения тесноты связи статистических данных об оценках интенсивности $\lambda_i(t_i)$ и аналитической экстраполирующей функции $\lambda(t)$. Количественно коэффициент детерминации равен квадрату корреляционного отношения [19]:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\lambda(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i(t_i) n_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\lambda_i(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i(t_i) n_i \right)^2}, \quad (22)$$

где: $\lambda(t_i)$ – значение экстраполирующей функции для интенсивности λ в момент t_i ; λ_i – значение оценки интенсивности в момент t_i ; n – число значений оценки интенсивности λ ; t_i – номер момента времени.

Также для оценки тесноты связи статистических данных о $\lambda_i(t_i)$ и аналитической экстраполирующей функции $\lambda(t)$ может применяться коэффициент неопределенности, значение которого обратно коэффициенту детерминации [19]:

$$U=1-B. \quad (23)$$

Коэффициент устойчивости ρ определяет устойчивость экстраполирующей функции $\lambda(t)$ в процессе поступления новых статистических данных $\lambda_i(t_i)$. В качестве показателя устойчивости используется коэффициент корреляции рангов Спирмена количественно равный [19]:

$$\rho = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n \Delta \lambda_i^2, \quad (24)$$

где: n – число значений оценки интенсивности λ ; $\Delta \lambda_i$ – разность фактических значений оценки интенсивности $\lambda_i(t_i)$ и значений $\lambda(t)$ в одни и те же номера циклов управления ЛА.

Необходимо отметить, что оценка устойчивости $\rho \rightarrow 1$ означает случай устойчивости при постоянном росте уровней λ . В тоже время $\rho \rightarrow (-1)$ означает случай устойчивости при постоянном сокращении уровней λ [19].

Оценка средней ошибки экстраполяции ε позволяет оценить степень точности, с которой экстраполирующая функция $\lambda(t)$ описывает статистический процесс $\lambda_i(t_i)$. Количественно средняя ошибка экстраполяции равна [18]:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|\lambda_i(t_i) - \lambda(t_i)|}{\lambda_i(t_i)} \right). \quad (25)$$

Таким образом, при анализе адекватности экстраполирующих функций (14) и (18) статистическим данным об оценках интенсивности информационного обмена $\lambda_i(t_i)$ используется комплексный критерий оценки [18]:

$$\begin{cases} U \rightarrow 0; \\ |\rho| \rightarrow 1; \\ \varepsilon \leq 0,15. \end{cases} \quad (26)$$

В случае если полученное по выражениям (14) и (18) экстраполирующие функции $\lambda(t)$ оказываются не адекватны статистическим данным об оценках интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$ необходимо продолжить накопление статистических данных о значениях $\lambda_i(t_i)$ до тех пор, пока указанные функции не станут соответствовать необходимому уровню адекватности.

Формирование итоговой оценки интенсивности нестационарного потока трафика в канале управления летательным аппаратом на следующий цикл управления

При экстраполяции оценки интенсивности информационного потока λ существенным является разделение всей интенсивности трафика передаваемого в канале управления ЛА на постоянную и переменную составляющие.

Постоянная составляющая интенсивности трафика представляет собой данные, которые регулярно с известной интенсивностью передаются по направлениям ПУ–ЛА и ЛА–ПУ. К таким данным можно отнести:

- регулярный обмен данными по запросу «свой-чужой»;

- запросы на координаты ЛА;
- сообщения об остатке топлива на борту ЛА;
- команды наведения для ЛА;
- доклады на ПУ о состоянии и режимах функционирования БРЭО ЛА.

Именно такой информационный обмен с высокой степенью достоверностью описывается моделью трафика в виде стационарного пуассоновского потока с постоянной интенсивностью на отдельных этапах полета ЛА, представленной в 1-й части данного исследования [10].

Нестационарная составляющая трафика в канале управления ЛА представляет собой не только данные, обмен которыми носит не регулярный характер, но и те данные объем которых может существенно варьироваться в широком диапазоне. К таким данным, относится:

- данные воздушной обстановки в районе выполнения ЦЗ (составляют основной вклад в нестационарную составляющую трафика циркулирующего в канале управления ЛА);
- данные о координатной поддержке для ЛА на этапе наведения и нанесения удара по цели;
- служебная информация о месте ЛА в группе, ее целях и задачах в группе;
- информационное обеспечение взаимодействующих групп ЛА и т. д.

Интенсивность обмена такими данными обуславливаются конкретной ситуацией и складывающейся в районе выполнения ЦЗ обстановкой. Обмен такими данными требует применения моделей с нестационарным пуассоновским потоком. Однако в силу своей высокой корреляции (даже в быстроменяющихся условиях целевого применения) при переходе от одного цикла управления ЛА к следующему циклу, нестационарная интенсивность обмена такими данными может быть оценена и экстраполирована аналитическими функциями. Применение таких функций обусловлено невозможностью, в общем случае, получить аналитическое решение для модели СВРС в виде СМО с входным нестационарным пуассоновским потоком.

С учетом вышеуказанного, интенсивность нестационарного потока в канале управления ЛА в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$\lambda(t) = \lambda_{det}(t) + \lambda_{var}(t), \quad (27)$$

где: $\lambda_{det}(t)$ – постоянная составляющая интенсивности трафика; $\lambda_{var}(t)$ – переменная составляющая интенсивности трафика. С учетом того, что постоянная составляющая интенсивности $\lambda_{det}(t)$ априорно известна на всех этапах управления ЛА, а в период полета ЛА для всех предшествующих циклов управления ЛА t_i возможно получение оценок интенсивности $\lambda_i(t_i)$, получим выражение для переменной составляющей интенсивности информационного обмена:

$$\lambda_{var}(t_i) = \lambda(t_i) - \lambda_{det}(t_i). \quad (28)$$

Именно интенсивность $\lambda_{var}(t_i)$ определяемая выражением (28) и будет экстраполироваться уравнениями (14) и (18) и в дальнейшем использоваться для

формирования прогноза интенсивности трафика $\lambda(t_{i+1})$ в канале управления на следующий t_{i+1} цикл управления ЛА.

Выражение (28) используется для построения статистических данных об оценке переменной составляющей интенсивности информационного обмена в СВРС. При этом моменты времени t_i – дискретны и соответствуют концам циклов управления соответствующего АСУ. По известным статистическим данным $\lambda_i(t_i)$ производится экстраполяция $\lambda_{var}(t_i)$ функциями вида (14) и (18). Вид применяемой экстраполирующей функции определяется выполнением условия (10). Время накопления необходимой статистики обуславливается объемом данных об оценках интенсивности $\lambda_i(t_i)$ (28) и адекватностью вышеуказанных функций, и определяется выполнением интегрального критерия (26).

При сформированной функции экстраполяции $\lambda(t)$ решим задачу экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА, как минимум, на следующий t_{i+1} цикл управления АСУ.

Определим СКО интенсивности нестационарной составляющей трафика $\sigma(\lambda_{var})$ как оценку генерального СКО с учетом потери одной степени свободы вариации [19]:

$$\sigma(\Delta\lambda_{var j}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\lambda_{var i} - \Delta\lambda_{var cp j})^2}{n_j - 1}}; j = 1, 2, \quad (29)$$

где: n – число значений оценки интенсивности λ ; $\tilde{\Delta}_i$ $\Delta\lambda_{var i}$ – оценка цепного прироста λ_{var} на каждом из i наблюдений: $\Delta\lambda_{var i} = \lambda_{var i+1} - \lambda_{var i}$;

$\Delta\lambda_{var cp j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta\lambda_{var i}$; $j = 1, 2$ – среднее статистическое оценки $\Delta\lambda_{var}$ за период из n наблюдений.

Из выражения (29) определяется средняя ошибка прогноза нестационарной составляющей интенсивности на будущие моменты времени t_k ($t_k > t_n$) которые соответствуют последующим циклам управления ЛА [7]:

– для однократного выравнивания:

$$\varepsilon(\lambda_{var}(t_k)) = \sigma(\Delta\lambda_{var j}) \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{t_k}{\sum_{i=1}^n t_i^2}}; \quad (30)$$

– для многократного скользящего выравнивания при l сдвигах базы длиной n_b :

$$\varepsilon(\lambda_{var}(t_k)) = \sigma(\Delta\lambda_{var j}) \sqrt{\frac{1}{n_b} + \frac{t_k}{l \sum_{i=1}^n t_i^2}}. \quad (31)$$

Методами математической статистики [19] доказываем, что возможны следующие приближения:

$$\sum_{i=1}^n t_i^2 \approx \frac{n^3 - n}{12} \text{ – для однократного выравнивания;}$$

$$\sum_{i=1}^n t_i^2 \approx \frac{n_b^3 - n_b}{12} \text{ – для многократного скользящего выравнивания.}$$

С учетом этого, выражения для средней ошибки прогноза нестационарной составляющей интенсивности трафика примут вид:

– для однократного выравнивания:

$$\varepsilon(\lambda_{var}(t_k)) = \sigma(\Delta\lambda_{var j}) \sqrt{\frac{12nt_k + n^3 - n}{n(n^3 - n)}}; \quad (32)$$

– для многократного скользящего выравнивания:

$$\varepsilon(\lambda_{var}(t_k)) = \sigma(\Delta\lambda_{var j}) \sqrt{\frac{12t_k n_b + n_b^3 l - n_b l}{n_b(n_b^3 l - n_b l)}}. \quad (33)$$

Для получения абсолютного значения границ прогноза для нестационарной составляющей интенсивности трафика $\lambda_{var}(t_k)$ следует среднюю ошибку прогноза $\sigma(\lambda_{var})$ умножить на величину t -критерия Стьюдента при принятой доверительной вероятности, при числе степеней свободы равной $n-2$ для линейной функции экстраполяции и $n-3$ – для параболической. Таким образом, предельная ошибка прогноза будет равна [19]:

$$\Delta\lambda_{var}(t_k) = t \cdot \varepsilon(\lambda_{var}(t_k)), \quad (34)$$

где t определяется из распределения Стьюдента $2 \int_0^t S_N(t) dt = \beta$, при доверительной вероятности β и N степенях свободы.

Выражение (34) позволяет получить с доверительной вероятностью β абсолютное значение ошибки прогноза $\Delta\lambda_{var}(t_k)$ в применении к переменной составляющей интенсивности информационного обмена в момент t_k .

Необходимо учесть, что выражение (34) определяет абсолютное значение ошибки в определении $\Delta\lambda_{var}(t_k)$, в то время как для практических нужд необходимо использовать верхнюю границу абсолютного значения этой интенсивности, как пессимистическую оценку прогноза. С учетом данного замечания и с учетом (34) выражение (27) примет вид:

$$\lambda(t_k) = \lambda_{det}(t_k) + \lambda_{var}(t_k) + \Delta\lambda_{var}(t_k). \quad (35)$$

Выражение (35) определяет максимальное значение интенсивности трафика в канале управления ЛА, прогнозируемое на момент t_k , с учетом постоянной составляющей интенсивности $\lambda_{det}(t_k)$, экстраполируемого значения переменной составляющей интенсивности $\lambda_{var}(t_k)$ информационного обмена в канале управления ЛА и абсолютным значением ошибки $\Delta\lambda_{var}(t_k)$ в определении этого экстраполируемого значения (рис. 7).

Необходимо отметить, что многократное скользящее выравнивание возможно применить при накоплении большого объема статистических данных (ориентировочно $n > 20$) об оценках интенсивности трафика $\lambda_i(t_i)$ в каналах управления ЛА. Таким образом, анализ статистических данных об оценках интенсивности $\lambda_i(t_i)$ целесообразно производить в два этапа.

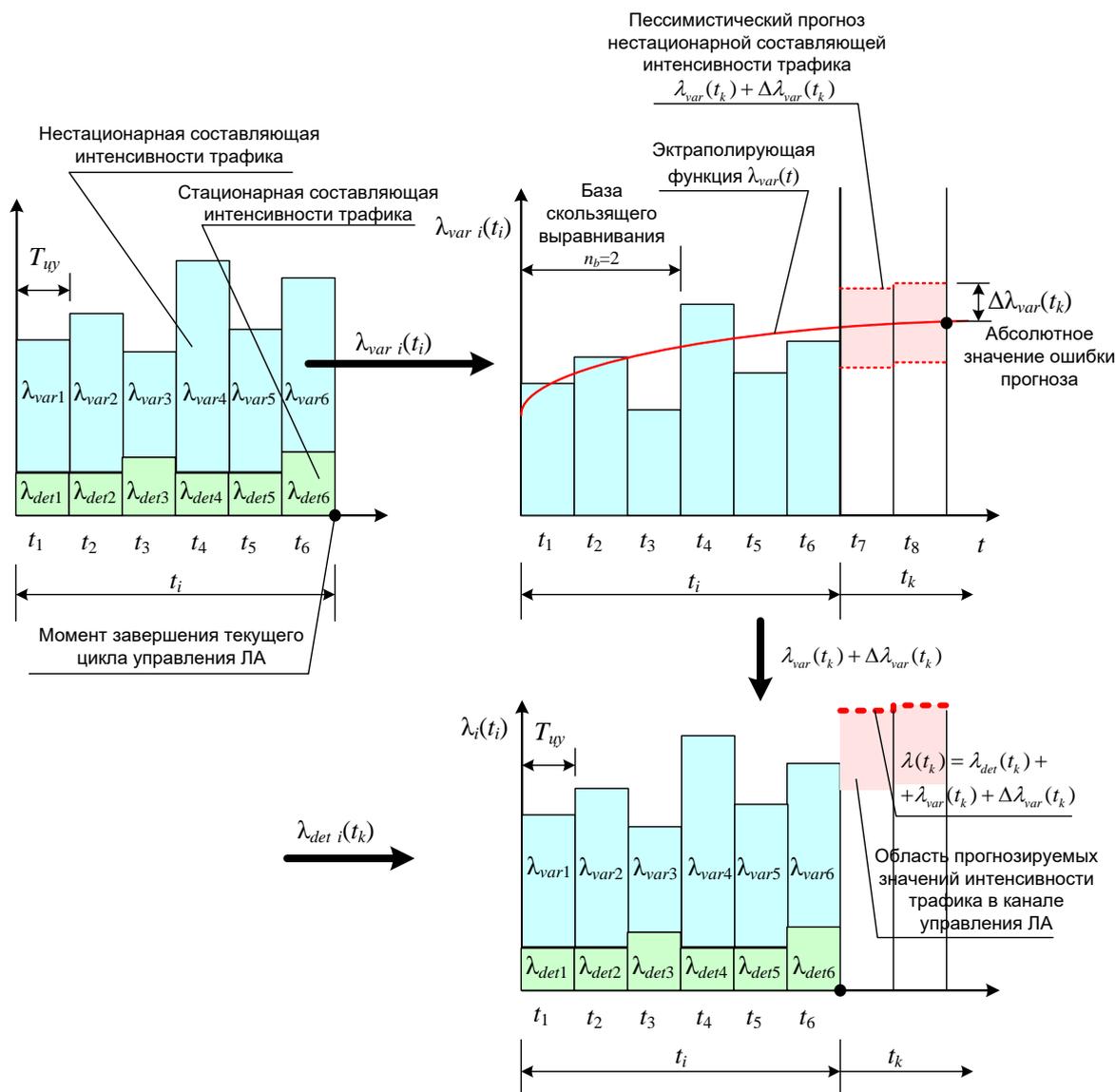


Рис. 7. Процесс экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА

На первом этапе производится накопление данных об оценках интенсивности информационного обмена в СВРС до момента соответствия используемой для экстраполяции функции интегральному критерию адекватности (26). На данном этапе производится однократное выравнивание накопленных статистических данных $\lambda_i(t_i)$.

На втором этапе при накоплении большего объема статистических данных об оценках интенсивности трафика в каналах управления ЛА целесообразно использовать многократное скользящее выравнивание накопленных статистических данных $\lambda_i(t_i)$ (при условии соответствия экстраполирующей функции интегральному критерию адекватности) так как это снизит предельную ошибку экстраполяции по сравнению с методом однократного выравнивания.

Общая последовательность экстраполяции и прогнозирования интенсивности трафика в канале управления ЛА представлена на рис. 8.

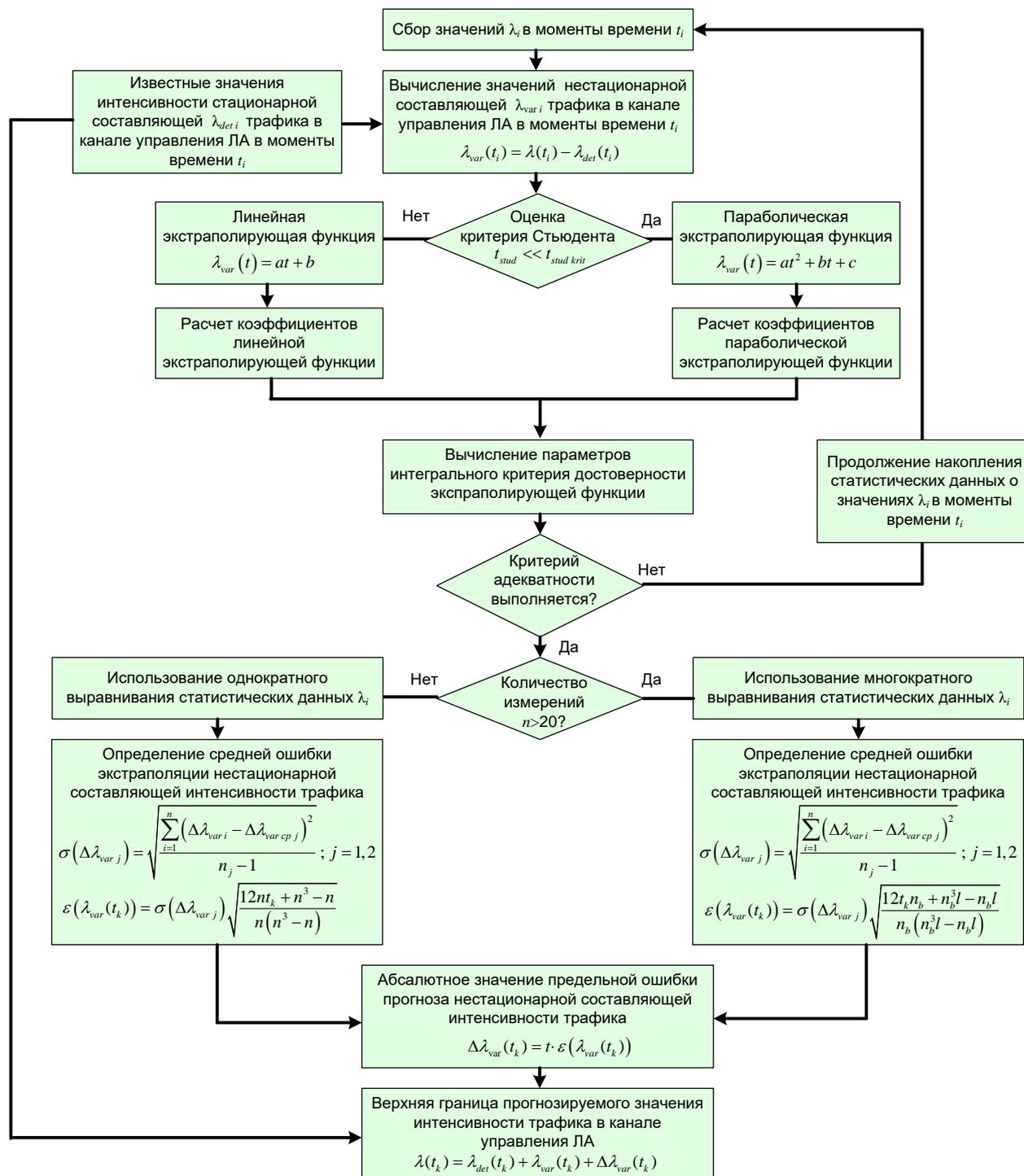


Рис. 8. Общая последовательность экстраполяции интенсивности трафика в канале управления ЛА

Выводы

Для решения задачи адаптивного распределения ресурсов СВРС в соответствии с этапами полета ЛА и интенсивностями передаваемых в каналах управления трафика требуется сформировать прогноз интенсивности трафика на следующий цикл управления ЛА в каждом канале. Для решения этой задачи предложено использование математических методов экстраполяции, а само решение представить в виде теоритических результатов, экстраполирующих трафик, передаваемого по каналам СВРС при управлении ЛА.

Для экстраполяции трафика, передаваемого по каналам управления летательным аппаратом использованы линейная и параболическая функции изменения интенсивности трафика в канале управления, обоснован критерий выбора одной из этих функций, а также введены операции, учитывающие ошибки прогноза при формировании экстраполированного значения интенсивности трафика в канале на следующем цикле управления ЛА, а так же введены операции оценивающие адекватность формируемой экстраполирующей функции, и условие использования однократного сглаживания статистических данных об интенсивности трафика, или многократного сглаживания при накоплении достаточного количества статистики, что позволяет значительно снизить ошибку прогноза. Эти операции составляют новизну полученных в статье теоритических результатов.

Отдельные результаты данной работы получены в рамках государственной темы НИР СПИИРАН № 0073-2019-0004.

Литература

1. Меркулов В. Н., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.
2. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турнецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиоуправления. Том 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
3. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевого обмена с целью повышения пропускной способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.
4. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С. Перспективы ведения боевых действий с использованием сетевых технологий // Военная мысль. 2014. № 3. С. 3-12.
5. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.
6. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевого обмена с целью повышения пропускной способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.
7. Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН основанная на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков // Системы

управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 54-68. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10304.

8. Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН основанная на децентрализованном принципе ретрансляции информационных потоков // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 57-68. DOI: 10.18469/ikt.2018.16.1.06

9. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А., Шунулин А. В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевых обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

10. Иванов М. С., Понаморов А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 1. Модель интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 120-147. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147.

11. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федунцов Б. Е., Широков Л. Е. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. – 816 с.

12. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

13. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 67-97. – URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).

14. Макаренко С.И. Особенности распределения ресурсов радио сети управления авиационными комплексами перехвата в условиях варьирования интенсивности информационного обмена // Материалы Всероссийской научно-технической конференции VIII научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского. Часть 2. – М.: изд. ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 2007. – С. 118.

15. Данилов А. М., Гарькина И. А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем. Монография. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с.

16. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.

17. Месарович М., Такахара И. Общая теория систем: Математические основы. – М.: Мир, 1978. 311 с.

18. Анализ данных: учебник для академического бакалавриата / под ред. В.С. Мхитаряна. – М. : Издательство Юрайт, 2016. – 490 с.

19. Блекуэлл Д., Гиршик М. А. Теория игр и статистических решений / Пер с англ. под ред. Б.А. Севостьянова. – М.: Иностранная литература, 1958. – 374 с.

20. Макаренко С. И., Пономарев А. В. Исследование влияния своевременности передачи команд в сети воздушной радиосвязи на качество наведения летательного аппарата на цель // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 126-131. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-126-131.

21. Федюнин П. А., Юрченко С. П., Головченко Е. В., Блинов П. В., Эсаулов С. А. Программа расчета вероятности обнаружения цели бортовыми средствами самолета в зависимости от задержки информации на пункте управления о воздушной обстановке // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019662107, 17.09.2019.

References

1. Merkulov V. N., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravleniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).

2. Merkulov V. I., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., Khar'kov V. P. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 3. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia* [Aviation radio system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).

3. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A. Application Mesh-технологий in systems of the gateway exchange for the purpose of increase of throughput of communication channels. *Okhrana, bezopasnost, sviaz*, 2017, no. 1-1. pp. 196-203 (in Russian).

4. Bogdanov A. Ye., Popov S. A. Ivanov M. S. Prospects of warfare using network-centric technologies. *Military Thought*, 2014, no. 3, pp. 3-12 (in Russian).

5. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosviasi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Information and Control Systems*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

6. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A. Application Mesh-технологий in systems of the gateway exchange for the purpose of increase of throughput of communication channels. *Okhrana, bezopasnost, sviaz*, 2017, no. 1-1. pp. 196-203 (in Russian).

7. Smirnov S. V., Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. Integral radio network of aircrafts control from AWACS based on the hierarchical principle of

routing. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 54-68 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10304.

8. Smirnov S. V., Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov A. S. AWACS guided integrated aircraft control radio network based on decentralized routing. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 57-68 (in Russian). DOI: 10.18469/ikt.2018.16.1.06.

9. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A., Shunulin A. V. Increasing space-air communications system network bandwidth using Mesh technology in interworking systems. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

10. Ivanov M. S., Ponamarev A. V., Makarenko S. I. Simulation of the teletraffic that transmitted in a radio channel of control combat aircraft. Part 1. Non-stationary teletraffic intensity model at various stages of the flight. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 6, pp. 120-147 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147.

11. Babich V. K., Bakhanov L. E., Gerasimov G. P., Gindrankov V. V., Grishin V. K., Goroshchenko L. B., Zinich V. S., Karpeev V. I., Levitin V. F., Maksimovich V. A., Polushkin Iu. F., Slatin V. V., Fedosov E. A., Fedunov B. E., Shirokov L. E. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tehnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).

12. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funkcionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).

13. Aganesov A. V. Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 67-97. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

14. Makarenko S. I. Osobennosti raspredeleniia resursov radio seti upravleniia aviatsionnymi kompleksami perekhvata v usloviakh var'irovaniia intensivnosti informatsionnogo obmena [Features of resource allocation radio network control aircraft interception complexes in terms of the variation of the intensity of data exchange]. *Materialy nauchno-tehnicheskoi konferentsii "VIII nauchnye chteniia po aviatsii, posviashchennye pamiati N.E. Zhukovskogo"* (Proceedings of the 8nd All-Russian Scientific Conference on Aviation, Dedicated to the Memory of N. E. Zhukovsky). Part 2, Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2007, 118 p. (in Russian).

15. Danilov A. M., Garkina I. A. *Interpolyaciya, approksimaciya, optimizaciya: analiz i sintez slozhnyh sistem. Monografiya* [Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems. Monograph]. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2014. 168 p. (in Russian).

16. Venttsel E. S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2002. 575 p. (in Russian).
17. Mesarovic M. D. Takahara Y. *General systems theory: mathematical foundations*. New York, Academic press, 1975.
18. Mhitaryan V. S. *Analiz dannyh* [Data analysis]. Moscow, Yurajt Publ., 2016. 490 p. (in Russian).
19. Blackwell D. A., Girshick M. A. *Theory of games and statistical decisions*. – Courier Corporation, 1979.
20. Makarenko S. I., Ponamarev A. V. Study of the Impact of Timeliness of Command Transmission in an Air Radio Communication Network on the Guidance Quality of an Aircraft at a Target. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 126-131 (in Russian) DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-126-131.
21. Fedjunin P. A., Jurchenko S. P., Golovchenko E. V., Blinov P. V., Jesaulov S. A. *Programma rascheta verojatnosti obnaruzhenija celi bortovymi sredstvami samoleta v zavisimosti ot zaderzhki informacii na punkte upravlenija o vozduшной обстановке* [The program for calculating the probability of target detection by the aircraft's onboard means, depending on the delay of information at the control point about the air situation]. Patent RU 2019662107, 17.09.2019.

Статья поступила 25 ноября 2021 г.

Информация об авторах

Иванов Максим Сергеевич – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: сети и системы авиационной радиосвязи. E-mail: point_break@rambler.ru

Адрес: 394074, Россия, Воронеж, Старых Большевиков, д. 54а.

Понаморов Алексей Валерьевич – преподаватель кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования. Краснодарское высшее авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.И. Серова. Область научных интересов: сети и системы авиационной радиосвязи. E-mail: dimalex25@bk.ru

Адрес: 350090, Россия, Краснодар, Дзержинского, д. 35.

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д. 39.

Simulation of the teletraffic that transmitted in a radio channel of control combat aircraft. Part 2. Extrapolation and forecasting of the intensity of non-stationary traffic

M. S. Ivanov, A. V. Ponamorev, S. I. Makarenko

Relevance. The intensity of the use of the Russian Air Force increased significantly at the beginning of the XXI century. At the same time, problematic technical aspects of the operation and management of combat aircraft began to be identified more often. One of these aspects is the discrepancy between the high requirements for operational control of a combat aircraft and the truly timely teletraffic (commands and data on the air situation) transmission on an aircraft board. In particular, the combat aircrafts control network uses a way of direct assignment of time-frequency resources for individual radio channel of control aircraft. This does not allow adaptive allocation of time-frequency network resources if teletraffic changed. Preliminary studies have shown that when transmitting teletraffic, changes in the of transmitted teletraffic intensity on various flight stages and the gist of aircraft tasks are not taken into account. This leads to a decrease of the teletraffic timeliness and, as a result, to a decrease in the efficiency of combat aircraft control. Therefore, to increase efficiency of combat aircraft control necessary to distribute the time-frequency resources of the network taking into account the forecast of traffic intensity in the aircraft control channels. **The goal of the paper** is to extrapolate the of the non-stationary teletraffic intensity in the control aircraft channel to the next control cycle for further adaptive planning and distribution of the time-frequency resource of the aircrafts control network. **Novelty.** The novelty elements of the study are to uses the least squares method to extrapolate non-stationary teletraffic, real statistical data on teletraffic intensity in the control aircraft channel at each control cycle, as well as approximation errors that are taken into account. **The practical significance of the article** lies in the fact that the theoretical solutions for the approximation of non-stationary traffic in the control aircraft channel can be used to increase efficiency of combat aircraft control when aircraft is pointing at an aerial target.

Keywords: teletraffic, aerial radio communication network, aviation, communication organization, military aviation, aircraft control.

Information about Authors

Maxim Sergeevich Ivanov – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Aircraft Electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force “Military Air Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and J. A. Gagarin”. Field of research: systems and networks aeronautical radio communication. E-mail: point_break@rambler.ru

Address: 394074, Russia, Voronezh, Old Bolsheviks str., 54a.

Aleksey Valereevich Ponamorev – Lecturer of the Department of Aviation and Radio-electronic equipment. Krasnodar Higher Aviation School of Pilots named after Hero of the Soviet Union A.I. Serov. Field of research: systems and networks aeronautical radio communication. E-mail: dimalex25@bk.ru

Address: 350090, Russia, Krasnodar, Dzerzhinsky str. 35.

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Leading Researcher. St. Petersburg Federal research center of the Russian Academy of Sciences. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electro-technical University 'LETI'. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: 197376, Russia, Saint Petersburg, 14th Linia, 39.