

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И СЕТЯМИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Введение

Ряд задач по управлению решается в автоматическом режиме, другие выполняются как автоматизированные процедуры с включением в контур управления человека – лица, принимающего решение (ЛПР). Автоматические решения более приемлемы для пользователя. Вместе с тем, создание полностью автоматической телекоммуникационной системы (ТКС) в настоящее время нереально, ибо сложность и громоздкость задач не позволяют полностью формализовать общую проблему управления. В настоящее время формализованными являются лишь некоторые достаточно простые процедуры: физического, сетевого, канального и транспортного уровней. К таким относятся процедуры управления ресурсами, предоставление услуг, задачи резервирования и др. Некоторые из формализованных задач управления решаются как оптимальные, например, задачи маршрутизации, другие решаются как ситуационные, обеспечивающие рациональное управление режимами сетевых элементов, выполнением тех или иных процедур, в зависимости от складывающейся ситуации и текущего трафика.

Формализация задачи дискретной оценки и управления

Задача управления упрощается, когда ее удается поставить и решить как детерминированную, в стохастической же ситуации задача оптимизации приобретает дополнительные сложности. Стохастичность определяют не только помехи в канале измерения и наблюдения. Вероятностный характер имеют и сами данные, поступающие по сетям сигнализации, от измерительных датчиков, поскольку сам трафик является случайным и нестационарным.

Важное значение для оптимизации управления в стохастической ситуации имеет теорема о разделении, суть которой заключается в выполнении определенных условий:

- шумы в канале наблюдения и управления – гауссовы;
- модель состояния оцениваемого объекта – линейна;
- функционал качества управления и оценки состояния – среднеквадратический.

В этом случае решение стохастической задачи управления можно представить в виде последовательности двух отдельных процедур: оптимального стохастического оценивания и детерминированного управления [2]. Известно [1], что для линейной стохастической системы $x(k)$ оптимальное управление $u(k)$ находится в виде линейного функционала:

$$u(k) = L(k)\hat{x}(k), \quad (1)$$

где $\hat{x}(k)$ – оптимальная оценка состояния.

Обобщенная структура управления представлена на рис. 1.

Как следует из выражения (1), основным элементом при реализации оптимального управления $u(k)$ является процедура оценки $\hat{x}(k)$, представленная в виде алгоритма Калмана-Бьюси [2], поскольку именно она непосредственно влияет на качество управления. Рассмотрим эту процедуру более подробно.

Уравнение состояния, стохастической системы в дискретной форме принимает вид

$$x(k+1) = F(k+1, k)x(k) + G(k)\xi(k), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $F(k)$ и $G(k)$ – коэффициенты, соответственно состояния и генерации, $\xi(k)$ – процесс генерации типа белого гауссового шума со спектральной плотностью мощности $N_{\xi}(k)$.

Модель наблюдения, представляется в виде

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k). \quad (3)$$

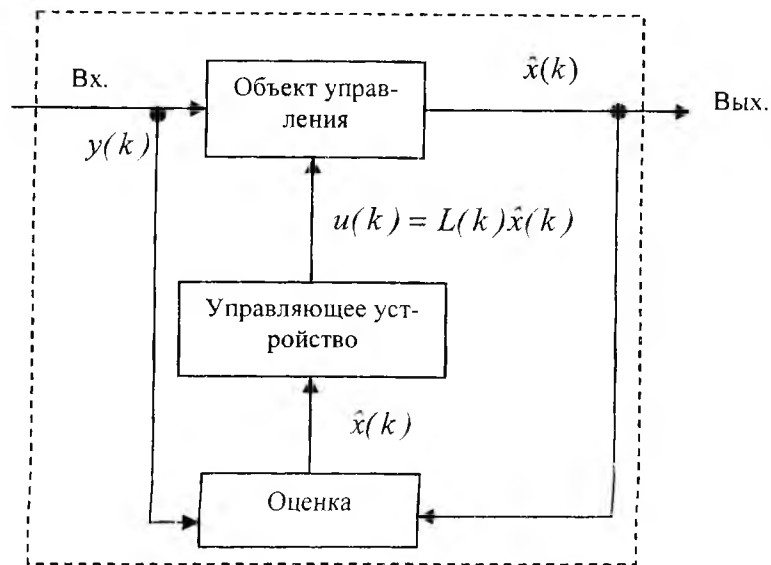


Рис. 1

Здесь процессы $y(k)$, $x(k)$ и $v(k)$ в общем случае являются векторами с M компонентами; $H(k)$ – масштабирующая матрица $M \times N$; $x(k)$ – векторный случайный процесс, определяющий состояние (1), значения которого необходимо оценить, $v(k)$ – гауссов белый шум наблюдения, со спектральной плотностью мощности $N_v(k)$. Шум $v(k)$ представляет собой реальный шум в канале наблюдения, он может иметь как энергетическую характеристику, так и не энергетическую, например: временной шум, ошибки при измерении таймаута, джиттера, задержки и др.

Уравнение оценки, удовлетворяющее критерию минимума среднего квадрата ошибки оценки $\tilde{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, имеет вид [2]:

$$\hat{x}(k) = F(k, k-1)x(k-1) + K(k)[y(k) - H(k)F(k, k-1)\hat{x}(k-1)], \quad (4)$$

где $K(k) = V_{\tilde{x}}(k)H^T(k)N_v^{-1}(k)$ – коэффициент, обеспечивающий оптимальность оценки и скорости сходимости процедуры.

Уравнение апостериорной дисперсии:

$$V_{\tilde{x}}(k) = [I - K(k)H(k)]V_{\tilde{x}}(k|k-1). \quad (5)$$

Анализ фильтра Калмана-Бьюси в условиях нестационарных воздействий проведем с использованием математической модели и модели машинного эксперимента, представленного в статье [5].

Анализ дискретного алгоритма фильтра Калмана-Бьюси при нестационарной ситуации

Для анализа эффективности фильтра в нестационарных условиях была модернизирована модель наблюдения (3). В уравнение наблюдения была введена аддитивная добавка, отображающая изменение уровня и скорость изменения этих нестационарностей. Учитывая, что изменения трафика являются результатом множественных воздействий на нагрузку сети, в качестве основной модели нестационарности была выбрана модель синусоидальной нестационарности:

$$y(k) = H(k)x(k) + C \sin(lk \Delta t / \tau_{кор}) + v(k), \quad (6)$$

где l – множитель изменяющий период нестационарных воздействий, C – изменения амплитуды, $\Delta t / \tau_{кор}$ – отношение интервала между шагами дискретизации Δt к интервалу корреляции $\tau_{кор}$.

Данная модель позволяет исследовать влияние плавных нестационарных изменений, за счет изменения синусоидальной функции, а при значениях $\sin(l k \Delta t / \tau_{\text{кор}}) = 1$, за счет изменений C можно имитировать скачкообразные изменения. Сопоставим период нестационарности с периодом установления стационарного режима $\tau_{\text{уст}}$. Было показано [5], что стационарный режим устанавливается на $n=4-6$ шагах дискретизации.

Рассмотрим влияние двух синусоидальных нестационарных изменений при ситуации:

1. Период нестационарности $T_s \approx \tau_{\text{уст}}$, то есть $T_s = 5\Delta t$; (рис. 2).

2. Период нестационарности $T_s \gg \tau_{\text{уст}}$, то есть $T_s = 500\Delta t$; (рис. 3).

На рис. 2 и 3 представлены фрагменты реализации случайного состояния при быстрых и медленных изменениях нестационарной функции $y(k)$ соответственно.

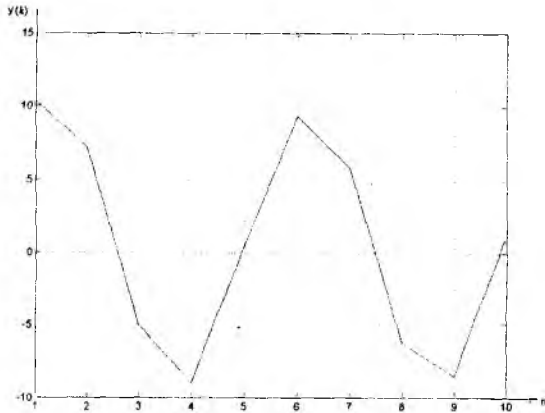


Рис. 2

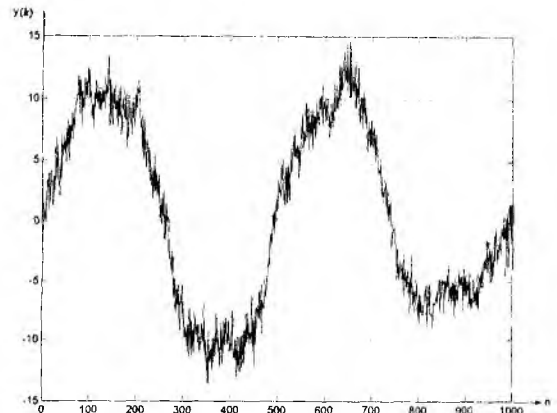


Рис. 3

Анализ качества оценки $\hat{x}(k)$ при синусоидальной нестационарности был проведен по значению выборочной апостериорной дисперсии ошибки оценки:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(k) - \hat{x}(k))^2, \quad (7)$$

На рис. 4 представлены графики выборочных значений апостериорных дисперсий σ_x^2 при различных значениях амплитуды нестационарной компоненты C и частоты синусоиды, определяемой коэффициентом l .

Как видно из графиков, при быстрых нестационарных изменениях $x(k)$, когда $\frac{T}{\tau_{\text{уст}}} \approx 1$, апостериорная дисперсия имеет резкую тенденцию к увеличению. При этом $(\sigma_x^2 / V_\phi) \gg 1$, что является признаком неустойчивости или даже расходимости процедуры.

Очевидно, что такие быстрые нестационарные изменения становятся соизмеримыми со временем установления процесса. В этом случае влияние нестационарности состоит в том, что установившийся процесс оценки еще не наступил, а в результатах наблюдения уже появились изменения, на которые фильтр должен реагировать как на вновь появившуюся информацию. Таким образом, фильтр работает постоянно, как бы в переходном режиме.

При более медленном изменении нестационарности $\Delta t / \tau_{\text{уст}} = 25$ и $\Delta t / \tau_{\text{уст}} = 500$ выборочные значения апостериорных дисперсий уже меньше отличаются от результатов воздействия обычного стационарного процесса. Таким образом, при плавных изменениях стационарной компоненты наблюдаемого процесса достаточной точности оценки можно добиться за счет сокращения шага дискретизации.

Рассмотрим влияние нестационарных процессов при скачкообразном изменении параметров нестационарности. Скачкообразные изменения также характерны для телекоммуни-

кационных систем. Так, включение и выключение потребителей с мощным информационным потоком приводит к скачкообразным изменениям нагрузки. Для моделирования скачкообразных изменений воспользуемся аддитивной добавкой, которая входит в уравнение (5), в которой $\sin(lk \Delta t / \tau_{кор}) = 1$, а значение C будет представлять собой меандр с периодом 100 шагов дискретизации с различными значениями амплитуды C .

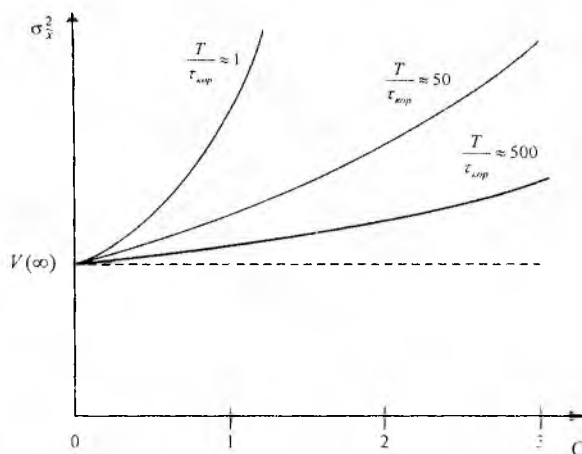


Рис. 4

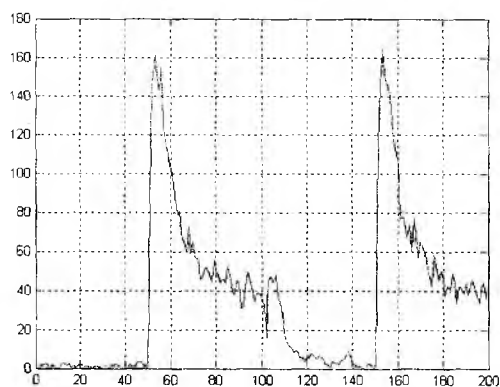
На рис. 5 – 8 представлены выборочные значения апостериорных дисперсий в зависимости от числа шагов дискретизации. Приведенные на рис. 5 и 6 графики для шага дискретизации $\Delta t / \tau_{кор} = 0,1$ и значения C соответственно $C_1 = 5$ $C_2 = 10$. Выборочная дисперсия при этом вычислялась не по значению $\tilde{x}(k)$ с последующим усреднением по реализации, а на каждом шаге с усреднением по ансамблю десяти независимых реализаций.

Из графиков следует, что появление нестационарностей в виде меандра длительностью 50 шагов приводит к резкому изменению режима. Импульсный перепад на 50 и 150 шаге дискретизации приводит к резкому увеличению значений апостериорной дисперсии. Значение апостериорной дисперсии сразу же после появления нестационарного импульса достигает значений 150 и более, в то время как в стационарном состоянии на участке от 0 до 50 шагов это значение составляет $\sigma_x^2 < 1$. Переходный процесс, образующийся вследствие появления нестационарного импульса, длится до 5...10 интервалов корреляции. В силу больших значений апостериорной дисперсии ошибки на этом переходном участке, оценка обладает большой погрешностью, что соответственно приводит к погрешности в управлении. Характерно также то, что при исчезновении нестационарного импульса реакция фильтра менее значима, чем при его появлении. Очевидно, что при появлении нестационарного импульса фильтр выводится из расчетного режима и ошибки резко возрастают, а при исчезновении импульса фильтр возвращается в расчетное состояние, что влечет за собой значительно меньшее возрастание ошибок переходного периода.

Из графиков следует, что на границах появления и исчезновения нестационарного импульса имеются небольшие всплески апостериорных дисперсий, которые не превышают общих типовых значений выборочной дисперсии и не превышает единицы. Таким образом, сокращение шага дискретизации позволяет отслеживать нестационарные изменения, что является важным фактором, обеспечивающим устойчивое функционирование алгоритмов оценки и управления.

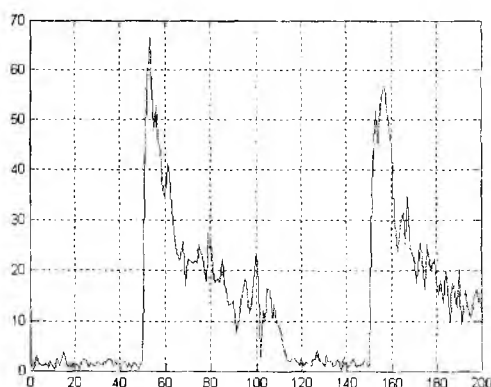
Из проведенного анализа следует, что наличие нестационарных компонент оцениваемого процесса приводит к увеличению апостериорных дисперсий ошибки оценки не только при плавных, но и особенно при импульсных нестационарных воздействиях. В тех случаях, когда имеется возможность увеличить производительность процедуры оценки и управле-

ния (сокращение шага дискретизации), влияние нестационарности может быть сведено к минимуму. Однако в практике связи такие технические решения возможны лишь при управлении внутри сетевого элемента или локальной группы сетевых элементов. В распределенных же сетях глобального WAN, регионального MAN и даже кампусного масштаба задержки в каналах наблюдения и сигнализации, в контурах управления и линиях связи оказывают заметное влияние.



$$\Delta t / \tau_{\text{кор}} = 0,1; C_1 = 10$$

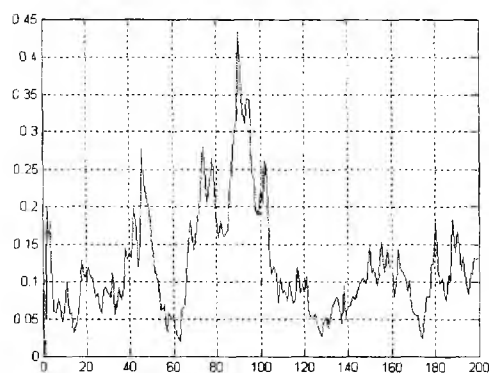
Рис. 5



$$\Delta t / \tau_{\text{кор}} = 0,1; C_2 = 5$$

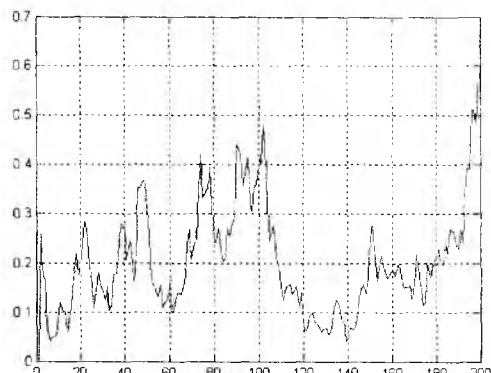
Рис. 6

На рис. 7 и 8 представлены графики выборочной дисперсии ошибки оценки для шага дискретизации $\Delta t / \tau_{\text{кор}} = 0,001$ и значения C соответственно $C_1 = 5$ и $C_2 = 10$.



$$\Delta t / \tau_{\text{кор}} = 0,001; C_1 = 5$$

Рис. 7



$$\Delta t / \tau_{\text{кор}} = 0,001; C_2 = 10$$

Рис. 8

Одним уменьшением шага дискретизации проблему качественной оценки и управления решить не удастся, поскольку к влиянию указанных задержек добавляются еще и технологические ограничения, связанные с тем, что служебная информация, данные от датчиков поступают на управляющие устройства с периодом, ограниченным выбранными технологическими параметрами. Так в VoIP, RTP пакеты следуют с периодом 5с, интервал же корреляции сетевого трафика может составлять десятки секунд, что исключает возможность сокращения шага дискретизации процедуры оценки и управления с интервалом меньше 5с. Поэтому приходится величину шага дискретизации $\Delta t / \tau_{\text{кор}}$ выбирать, сопоставляя его со временем задержки $\Delta T_{\text{зад}}$.

Заключение

Результаты анализа рекурсивного фильтра оценки состояния с нестационарным изменением состояния $x(k)$ показали:

1. При плавных, типа синусоидальных нестационарных воздействиях увеличение дисперсии ошибки оценки может возрасти в 2-4 и более раз по сравнению со стационарным случаем, особенно когда амплитуда этих нестационарных изменений становится соизмеримой с уровнем сигнала $x(k)$ или больше. Особое влияние имеет скорость изменения этих нестационарностей. При соизмеримом с интервалом корреляции периоде нестационарности апостериорная дисперсия может превышать значения в стационарном состоянии в сотни раз.

При скачкообразных изменениях воздействие нестационарности еще более выражено: скачек изменения состояния в 10 раз приводит к скачку дисперсии ошибок и наличию продолжительного переходного процесса превышающего интервал установления режима в стационарном состоянии.

2. В условиях нестационарности можно добиться высокой точности оценки состояния процесса и соответствующего управления за счет сокращения шага дискретизации, составляющего $\Delta t / \tau_{\text{кор}} = 0,01 \dots 0,001$. В тех же случаях, когда такую производительность реализовать не удастся из-за задержек в сети и сетевых элементах или за счет ограничения технологий измерения и наблюдения, необходимо принимать дополнительные меры по адаптации процедуры оценки к складывающейся нестационарной сигнально-помеховой обстановке в канале наблюдения.

Список литературы: 1. *Справочник по теории автоматического управления* / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с. 2. *Сейдж Э., Мелс Дж.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с. 3. *Родимов А. П., Поповский В. В.* Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех. М.: Радио и связь, 1984. 272 с. 4. *Математичні основи теорії телекомунікаційних систем* / За ред. В.В. Поповського. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с. 5. *Сокол Г.В., Поповская Е.В.* Анализ чувствительности фильтра Калмана-Бьюси к отклонению параметров выбранной модели // *Радиотехника*. 2007. Вып.147.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 14.09.2007