

УДК 621.396.2; 621.394.6

Поповский В. В., д.т.н.; Ощепков М. Ю.; Кобрин А. В., асп.
(Харьковский национальный университет радиоэлектроники)

АЛГОРИТМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ПОТОКОВОГО ВИДЕО В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Поповський В. В., Ощепков М. Ю., Кобрін А. В. Алгоритми попередньої компенсації джиттера при передачі потокового відео в безпроводових мережах. Запропонований адаптивний метод компенсації джиттера на межах розділення безпроводового середовища і транспорту, що дозволяє поліпшити якість передачі потокового відео. Метод реалізований за допомогою фільтру Калмана-Б'юсі на основі концепції потокового агента.

Ключові слова: ПОТОКОВЕ ВІДЕО, БЕЗПРОВІДНА МЕРЕЖА, КОМПЕНСАЦІЯ ДЖИТЕРА, ФІЛЬТР КАЛМАНА-Б'ЮСІ, ПОТОКОВИЙ АГЕНТ

Поповский В. В., Ощепков М. Ю., Кобрин А. В. Алгоритмы предварительной компенсации джиттера при передаче потокового видео в беспроводных сетях. Предложен адаптивный метод компенсации джиттера на границах разделения беспроводной среды и транспорта, позволяющий улучшить качество передачи потокового видео. Метод реализован с помощью фильтра Калмана-Бьюси на основе концепции потокового агента.

Ключевые слова: ПОТОКОВОЕ ВИДЕО, БЕЗПРОВОДНАЯ СЕТЬ, КОМПЕНСАЦИЯ ДЖИТТЕРА, ФИЛЬТР КАЛМАНА-БЬЮСИ, ПОТОКОВЫЙ АГЕНТ

Popovskiy V.V., Oshchepkov M. Yu., Kobrin A. V. Algorithms to preliminary jitter compensation at the transmission of stream video in wireless networks. The adaptive jitter compensation method on the boundaries separating the wireless environment and transport, allowing to improve the quality of streaming video. The method is implemented using the Kalman-Bucy filter based on the concept of streaming agent.

Key words: STREAMING VIDEO, WIRELESS NETWORK, JITTER COMPENSATION, KALMAN-BUCY FILTER, STREAMING AGENT

Введение. Цель данной статьи направлена на улучшение качества передачи потокового видео в беспроводных сетях. В частности, передача потоковое видео в нашем контексте означает, что часть видео контента доставлена от контент-сервера в проводную сеть к мобильному клиенту через последний хоп, беспроводное соединение. Контент расшифрован и просматривается клиентом, прежде чем полностью будет загружен.

В видео поверх IP сети каждое изображение или кадр могут быть закодированы в один или несколько пакетов данных, которые отправляются с минимальной задержкой ("спина к спине"). Кадры, как правило, генерируются с постоянной кадровой скоростью, по этой причине пакетные кластеры отправляются с той же постоянной скоростью. На приемной стороне пакеты приходят с переменной задержкой. Эта задержка объясняется главным образом задержками, вызванными IP-сетью, и интерпретируется как джиттер. Критичность джиттера может значительно различаться в зависимости от типа сети и текущего состояния сети. Например, дисперсия задержки пакетов может меняться на несколько порядков от одного типа сети к другой, или даже в разное время по одному и тому же пути сети.

Для мультимедийных потоков буфер воспроизведения приемника требует плавного изменения сетевой задержки. Известные решения, когда алгоритмы буфера воспроизведения, уменьшающие влияние джиттера, используют на конечном устройстве [1]. В данной статье предложен метод предварительной компенсации джиттера, что позволяет существенно улучшить качественные показатели у потребителя. Платформой для реализации компенсации джиттера выбран потоковый агент (ПА), находящийся на базовой станции беспроводной сети. ПА является популярной темой, а также имеет большой объем предыдущих исследований, сфокусированных на добавление дополнительных свойств ПА:

- ПА предоставляет обратную связь для контент сервера, используя различия между проводной и беспроводной частью сети [2];
- ПА дает возможность определить место пакетной ошибки [2];
- ретрансляция на прикладном уровне позволяет уменьшить пакетные искажения для приложений, невосприимчивых к задержке [3, 4];

- прямая коррекция ошибок позволяет уменьшить битовые искажения для приложений, восприимчивых к задержке [3, 4].

1. Анализ архитектуры потокового агента. При передаче мультимедийной информации по комбинированным сетям с учетом различных механизмов распространения с различными технологиями, важным является выполнение требований по качеству предоставления мультимедийной информации пользователю.

При этом важными являются такие характеристики, как задержка и число потерянных и поврежденных пакетов. Как показывает практика, наибольшие потери качественных характеристик происходит на границах операторских сетей и сетей с различными механизмами распространения.

Возникает необходимость установки соответствующих агентов, обеспечивающих мониторинг на том или ином промежутке сети. Вместе с тем от числа и места этих агентов существенно зависит качество мониторинга.

ПА это агент, который находится на базовой станции на пересечении проводной и беспроводной сети рис. 1. Агент просматривает и распознает потоки и периодически посылает статистические и своевременные обратные сообщения на отправляющий сервер. Статистические обратные связи помогают отправителю проследить проводное состояние сети, что существенно для выполнения надлежащего контроля над перегрузками. С другой стороны, ПА отправляет своевременные обратные сообщения, такие как подтверждение пакетов (ACKs), что сигнализирует отправителю о прибытии каждого пакета к агенту корректно и вовремя.

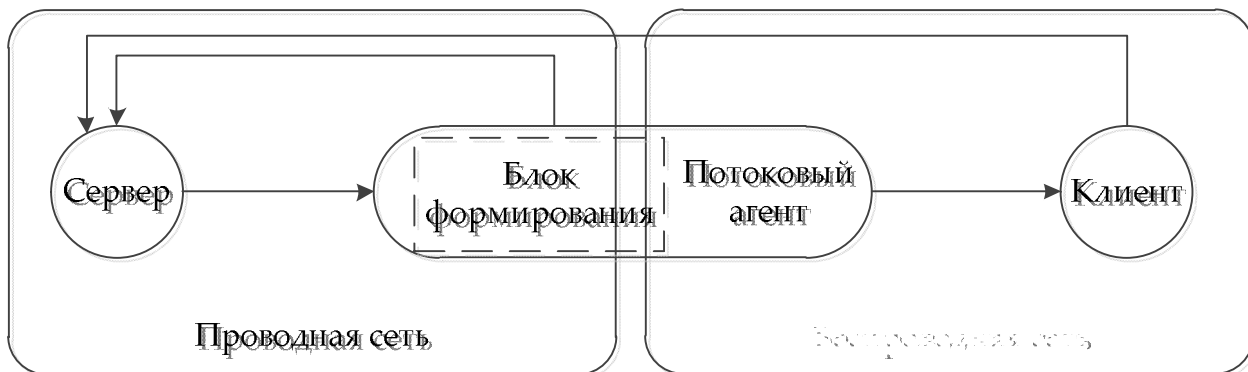


Рис. 1. Структурная схема функционирования потокового агента

Блок формирования находится перед ПА и ограничивает объем отправляемых сообщений, чтобы он не был больше, чем полоса пропускания беспроводной сети, храня пакеты, ожидающие фрагментации и передачи на более низкий уровень. Если состояние беспроводной сети плохое, число повторных передач будет расти, заставляя увеличиваться очередь пакетов. Блок формирования реагирует на заполненность очереди, отбрасывая пакеты до прибытия их к агенту.

2. Обзор оценки сетевой задержки. Для того чтобы воспроизводить видео поток, который соответствует оригиналу, который передается от источника, необходимо предоставить пакетные кластеры данных с той же постоянной скоростью, что и при отправлении. Устройство, которое часто называют, как джиттер-буфер, может быть внедрено в ПА. Джиттер-буфер способен погасить дрожание входящего потока пакетов и обеспечить постоянный поток данных для декодера. Это осуществляется путем удержания пакетов в буфере, что вносит задержку таким образом, что пакеты, которые подвергались большей задержки, придут вовремя.

Задержка в сети и ее изменчивость, как было сказано, являются одними из наиболее влиятельных аспектов сети для передачи потокового контента и VoIP. Рис. 2 иллюстрирует

эти понятия, выделив тонкое различие между задержкой и джиттером. Первая из трех циклограмм (рис. 2a) показывает физически невозможный сценарий, где сетевая структура демонстрирует отсутствие джиттера и задержки. На второй циклограмме (рис. 2b) демонстрируется наличие постоянной задержки, на третьей (рис. 2c) показано различное время прибытия каждого пакета. Сетевые структуры являются наиболее яркими примерами переменной временной задержки из-за изменчивости времени распространения, очереди задержек и изменчивости времени обработки.

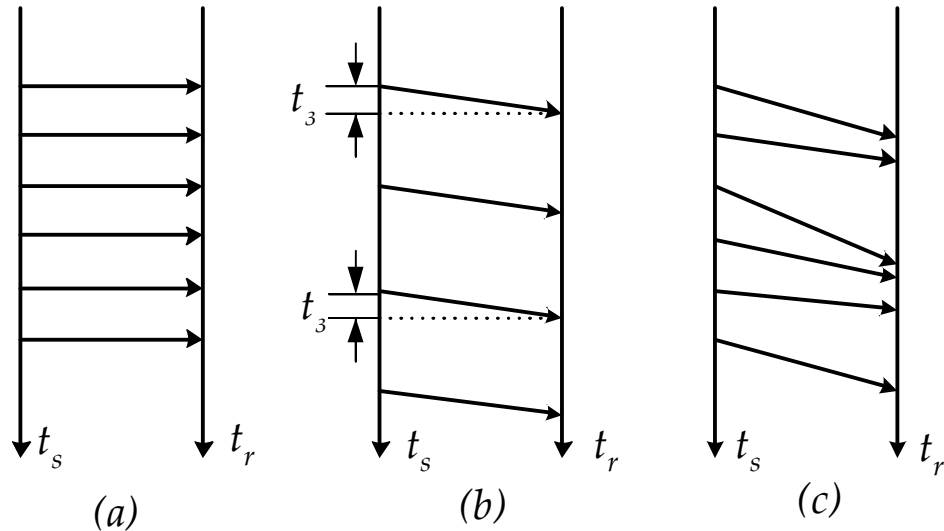


Рис. 2. Циклограммы передачи пакетов:
(a) – без задержек; (b) – с постоянной задержкой; (c) – с задержкой и джиттером

Оценка других характеристик сети, тоже может предоставить интерес, поскольку может обеспечить косвенные данные о сквозной задержке. Например, интервал между прибывшими пакетами (IAT), не являются информативной характеристикой, однако его можно использовать для оценки джиттера, если на стороне получателя известна частота генерации пакетов отправителя. Интуитивно понятно, что IAT должно быть точно равно обратной частоте генерации пакетов $\frac{1}{f}$, как показано на рис. 2 (b).

Как показано на рис. 3, присутствие джиттера можно символически записать как:

$$t_3(k) \neq t_3(k + 1),$$

где t_3 – это одностороннее время транзита.

Количественное соотношение, которое связывает время задержки t_3 , интервалы между пакетами Δt^{ia} и частоту генерации пакетов $f = \frac{1}{t_r}$, выражено в виде:

$$\Delta latency = t_3(k + 1) - t_3(k) = \Delta t^{ia}(k) - \frac{1}{f}. \quad (1)$$

В этой модели, изменения Δt^{ia} должны быть связаны с джиттером. На самом деле, правая часть может быть использована в качестве показателя того, что последний пакет прибыл раньше, чем ожидалось $\Delta t_i^{ia} - \frac{1}{f} < 0$, позже, чем ожидалось $\Delta t_i^{ia} - \frac{1}{f} > 0$, или джиттер задержки равен нулю $\Delta t_i^{ia} - \frac{1}{f} = 0$.

Уравнение (1) можно переписать, таким образом, что позволит рассчитывать последнее $t_3(k + 1)$ на основе предыдущей задержки пакета $t_3(k)$ и измерении Δt^{ia} .

$$t_3(k + 1) = t_3(k) + \left(\Delta t^{ia}(k) - \frac{1}{f} \right). \quad (2)$$

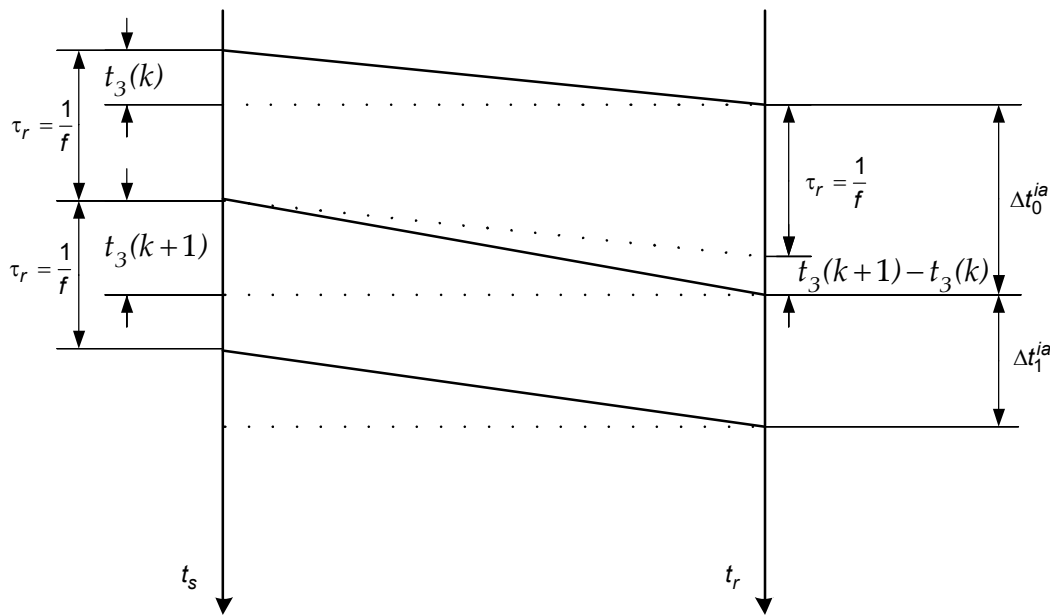


Рис. 3. Взаимоотношения между частотой генерации пакетов и интервалами между прибывшими пакетами

Уравнение (2) носит рекурсивную форму и может быть использовано в качестве основы для построения оптимальной процедуры оценки времени задержки $\hat{t}_3(k)$ на каждом из шагов ее вычисления. Представим уравнение в адаптированных к реальной задаче терминах:

$$t_3(k+1) = t_3(k) + [y_3(k) - \tau_r(k)], \quad (3)$$

где $y_3(k) = H(k)t_3(k) + v(k) = H(k)(t_n(k) - t_r(k)) + v(k)$ – измерение времени задержки прихода n -ого пакета;

$v(k)$ – погрешность измерений, которая появляется вследствие конечной точности измерения, конечной разрядности АЦП, обеспечивающего преобразование аналогового измерения $t_n(t)$ в цифровую форму $t_n(k)$, а также действие тепловых и иных шумов, действующих в цепях измерения;

$H(k)$ – весовой коэффициент, характеризующий усиление или ослабление измеряемой величины.

Процесс $v(k)$ можно аппроксимировать гауссовским белым шумом в силу множественности составляющих его компонент и выполнения условия центральной предельной теоремы.

Если представить разность в квадратных скобках (3) как невязку, то данные уравнения по сути можно отнести к уравнениям стохастической аппроксимации, имеющей вид [5]:

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

где $a(k)$ – последовательность коэффициентов, обеспечивающих сходимость и устойчивость процедуры (4) к установившемуся состоянию, когда оценка $\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) \rightarrow x(k)$.

Для коэффициентов $a(k)$ должны выполняться условия теоремы Дворецкого.

$$\sum_{k=1}^{\infty} a(k) \rightarrow \infty; \quad \sum_{k=1}^{\infty} a^2(k) < \infty; \quad 0 < a < 1. \quad (5)$$

Практика показывает, что и при более мягких ограничениях, по сравнению с (5) процедура (4) ведет себя также устойчиво [6]. Более того, она может быть выбрана постоянной с учетом $0 < a < 1$ и от величины $a(k)$ зависит конечная точность оценки и

скорость сходимости. Последнее свойство определило второе название данному коэффициенту как “шаговая постоянная”.

Таким образом процедура стохастической аппроксимации, применительно к терминам (3) принимает вид:

$$\hat{t}_3(k+1) = \hat{t}_3(k) + a(k)[y_3(k) - \hat{t}_3(k)], \quad (6)$$

где $y_3(k) = H(k)t_3(k) - v(k)$ – уравнение наблюдения. Очевидно, в силу аддитивности элементов невязки, можно шум $v(k)$ отнести к последнему слагаемому, поэтому (6) можно представить в классическом виде:

$$\hat{t}_3(k+1) = \hat{t}_3(k) + a(k)[H(k)\hat{t}_3(k) - y_\Gamma(k)], \quad (7)$$

$$y_\Gamma(k) = H(k)t_\Gamma(k) + v(k), \quad (8)$$

где $y_\Gamma(k)$ уравнение наблюдения.

Вместе с тем, получение оценки (6) и (7) в данном случае не является завершением задачи, поставленной в нашей работе. Главной задачей является получение алгоритма управления неким устройством, обеспечивающего компенсацию джиттера.

3, Синтез алгоритма управления джиттером. Из теории автоматического управления известна теорема о разделении [7, 8], утверждающая о том, что при среднеквадратичном критерии качества, которому удовлетворяют изложенные выше алгоритмы оценки (4), (6), (7), при гауссовской ситуации оптимальное уравнение можно построить из двух отдельных процедур: оптимальной стохастической оценки $\hat{x}(k)$, типа (6), (7), и детерминированной процедуры оценки типа:

$$u(k) = \mathcal{L}(k)\hat{x}(k).$$

Воспользуемся результатами данной теоремы.

Прежде, чем приступить к синтезу алгоритмов управления, следует уточнить, какие предполагается использовать электронные приборы, обеспечивающих управление фазой поступающих пакетов. Очевидно, этот прибор может обеспечивать аддитивную коррекцию (9) или мультипликативную коррекцию (10):

$$t_n \pm t_3 \quad (9) \qquad t_n(lt_3), \quad (10)$$

где l – масштабирующий множитель.

Очевидно, как одна коррекция (8), так и вторая (9) должны обеспечивать коррекцию t_n с условием:

$$t_3^2 \rightarrow 0, \quad (11)$$

Для разработки алгоритмов управления воспользуемся формальным аналогом данной задачи (4) с более общей задачей процедурой Калмана-Бьюси [6, 7], с учетом того, что переходной коэффициент (матрица) $\Phi(k+1, k) = I$:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi\hat{x}(k) + K(k)[H(k)\hat{x}(k) - y(k)], \quad (12)$$

где $K(k) = V(k)H^T(k)N_v^{-1}$ коэффициент, имеющий аналогичный $a(k)$ смысл, при котором процедура (12) обладает оптимальным свойством по скорости сходимости, минимуму среднеквадратичной ошибки и др. [7, 8]. Апостериорная дисперсия $V(k)$ определяется из решения уравнения Риккати:

$$V(k) = [I - K(k)H(k)]V(k, k-1);$$

$$V_{\hat{x}}(k, k-1) = \Phi^T(k, k-1)V(k-1)\Phi(k, k-1) + N_\xi. \quad (13)$$

Очевидно, для решения задачи необходимо выбрать вариант управления наблюдением (8), поскольку именно наблюдаемую величину необходимо корректировать, выбирая или оценивая соответствующую величину коэффициента $H(k)$. В литературе [9,10] процедуры оценки весовых коэффициентов известны как адаптивные алгоритмы Уидроу-Хоффа. Следуя данной литературе переобозначим $H(k) \equiv W(k)$ и будем находить оптимальную оценку этого коэффициента на основании уравнений (6), (7), (12):

$$\widehat{W}(k+1) = \widehat{W}(k) + A(k)[t_{\Pi}(k) - \widehat{W}(k)t_{\Gamma}(k)]t_{\Gamma}(k), \quad (14)$$

где $A(k)$ имеет тот же смысл, что $a(k), K(k)$.

Весовой коэффициент $\widehat{W}(k)$ может быть как вещественным, так и комплексным. В первом случае корректор фазы обеспечивает процедуру в соответствии с (9). Если $x(k)$ является гармоническим сигналом, то имеет смысл использовать фазу синусоиды и осуществлять более точное слежение.

Структурная схема устройства управления, реализующего алгоритм (14), представлена на рис 4.

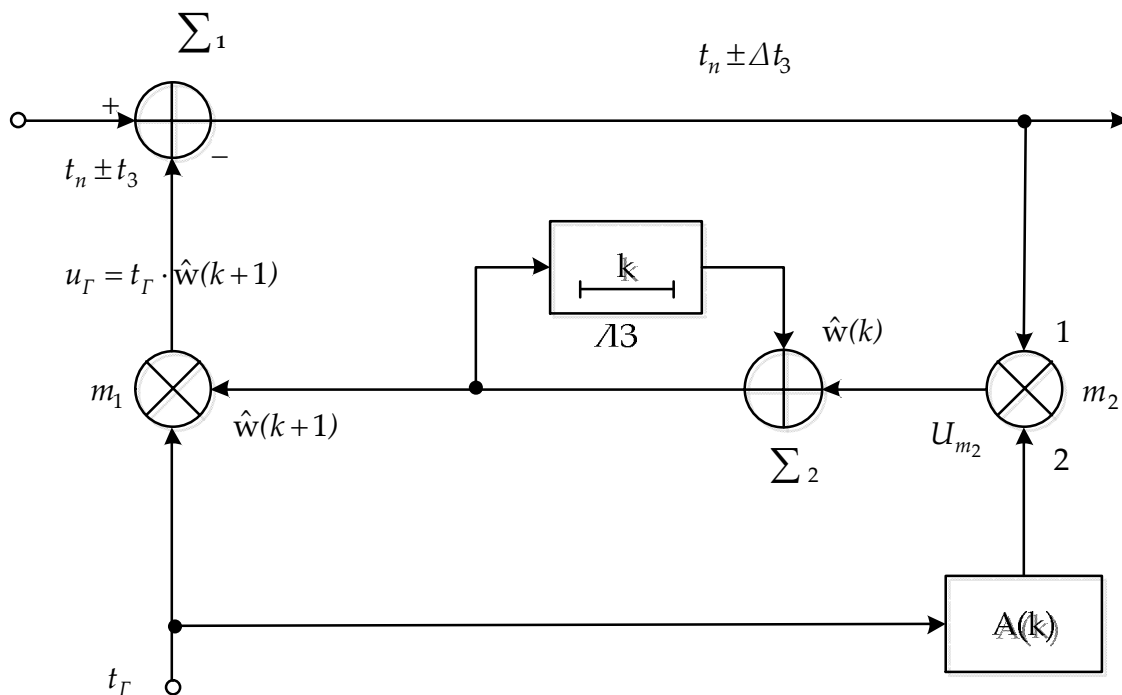


Рис. 4. Алгоритм управления джиттером с аддитивной коррекцией фазы

Аналогично предыдущему алгоритму построим алгоритм управления джиттером с мультипликативной коррекцией фазы рис. 5

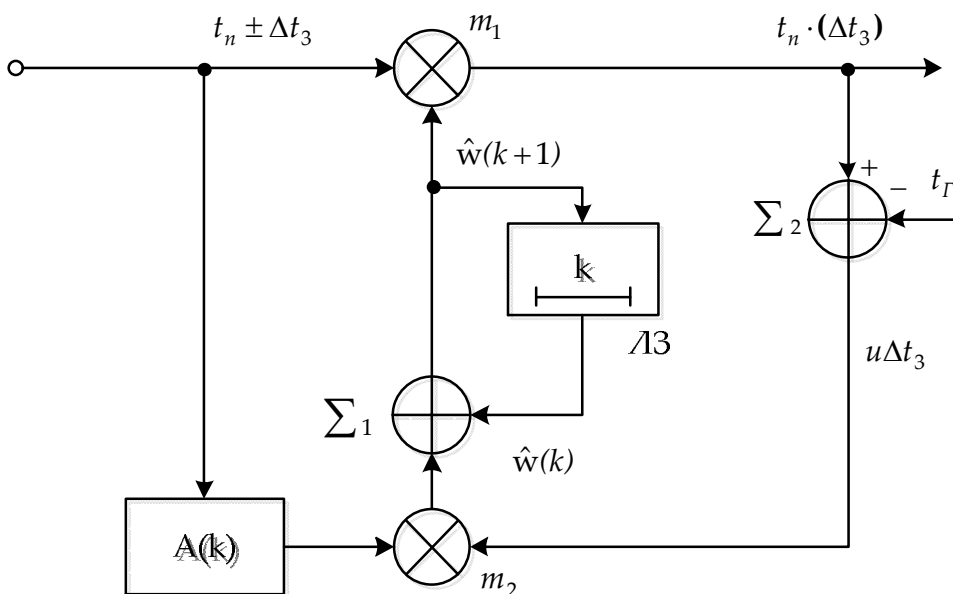


Рис. 5. Алгоритм управления джиттером с мультипликативным управлением фазы

Алгоритм работает следующим образом. Каждый из n -х поступающих на устройство коррекции информационных пакетов Σ_1 имеет соответствующее время прихода $\tau_n(i) = t_n(i) \pm t_3$. На второй вход этого устройства поступают управляющие сигналы $t_r(i)\hat{w}(k+1) = u_r$, содержащие информацию о том, на сколько следует скорректировать фазу (задержку) стробирующего отчета $t_r(i)$ с тем, чтобы в свою очередь скорректировать задержку t_3 (фазу пакета) $t_n \pm t_3$, приходящего на устройство Σ_1 . Поскольку задержка t_3 носит случайный характер, то на выходе Σ_1 всегда будет иметь место остаточная расстройка фазы $\pm \Delta t_3$. Сигнал этой расстройки поступает на перемножитель m_2 , на второй его вход поступает сигнал о i -ой фазе очередного стробирующего сигнала t_r . В результате перемножения на выходе m_2 имеем:

$$U_{m_2} = (U_{t_n} \pm U_{\Delta t_3} + U_{ш})(U_{t_r}) = U_{t_n} U_{t_r} \pm U_{\Delta t_3} U_{t_r} + U_{ш} U_{t_r}, \quad (15)$$

где $U_{ш}$ – напряжение шума имеющего место на выходе Σ_1 . Полученный сигнал U_{m_2} поступает далее на схему интеграции (сглаживания), образованную за счет линии задержки (ЛЗ) на 1 шаг (k), который предотвращает от резких скачков сигналов при формировании весового коэффициента $\hat{w}(k+1)$. Другое назначение интегрирующей схемы в том, чтобы сформировать интегральные суммы. Очевидно, что только интеграл от второго слагаемого (15) останется отличным от нуля в силу наличия статистической связи между перемноженными сигналами.

$$U_u = \pm \int U_{\Delta t_3} U_{t_r} dt \neq 0. \quad (16)$$

Остальные два крайних интеграла, в силу не коррелированности окажутся в среднем, равны нулю. Полученный сигнал (16) является, по сути, сигналом весового коэффициента:

$$U_u \equiv \hat{w}(k+1).$$

Действующий на входе m_1 сигнал $\hat{w}(k+1)$ обеспечивает коррекцию фазы t_r . Таким образом, коррекция фазы t_r будет корректироваться до тех пор, пока на 1 вход перемножителя m_2 будет поступать сигнал $U_{\Delta t_3}$. В результате действия такой кольцевой схемы с обратной связью постепенно уменьшается остаточное значение задержки Δt_3 и после некоего минимального значения наступает стабилизация.

Данная структура (рис. 4) используется многими специалистами и хорошо зарекомендовала себя на практике в алгоритмах управления адаптивными антенными решетками (ААР) [6, 9, 10].

Близкой по принципу является работа другой адаптивной схемы рис. 5. Здесь сигнал $U_{\Delta t_3}$ рассогласования фаз между $t_n(i)$ и $t_r(i)$ формируется на выходе сумматора Σ_2 . Далее на выходе перемножителя m_2 образуется суммарный сигнал рассогласования фаз, аналогичный (15) и после интегратора (Σ_1 и ЛЗ) формируется весовой коэффициент $\hat{w}(k+1)$, мультипликативно воздействующий на устройство m_1 , содержащий корректор фазы последовательности $t_n(i)$ до тех пор, пока на выходе Σ_2 будет действовать сигнал рассогласования фаз $U_{\Delta t_3}$.

Выводы.

1. Предварительная компенсация джиттера при передаче потокового видео на границе операторских сетей и сетей с различными механизмами распространения не только позволяет обеспечить качество параметров на всем пути от источника к потребителю, но также разгружают алгоритмы управления буфером воспроизведения, где накопившийся джиттер часто приводит к срыву картинки.

2. Особую роль в алгоритмах предварительной компенсации джиттера играет ПА, что дает возможность анализировать поток границах операторских сетей и сетей с различными механизмами распространения, где происходят наибольшие потери качественных характеристик.

3. Синтезированные адаптивные алгоритмы компенсации джиттера, построены на базе фильтров Калмана-Бьюси, что обеспечивает оптимальность их характеристик: быстродействие, минимум среднего квадрата ошибки оценки весового коэффициента, что управляет фазой контентного потока.

4. Рассмотрены два вида адаптивных компенсаторов джиттера с аддитивной и мультипликативной регулировкой фазы потока видео, что позволяет согласовывать выбранное устройство коррекции фазы с алгоритмом.

5. Анализ качества адаптивного компенсатора джиттера показывает, что время сходимости процедуры после рестарта к установившемуся состоянию составляет 5 - 10 шагов дискретизации и зависит от соотношения сигнал/шум в потоке. Остаточная расстройка, имеющая место в подобных системах управления типа Уатта, составляющая 3 - 5% от предполагаемого значения.

Литература:

1. Brita H. Hafskjold Gade. A statistically optimal algorithm for multimedia receiver buffers—*AiT e-dit AS, Oslo, 2008. – 300 p.*
2. Gene Cheung, Wai-Tian Tan, Takeshi Yoshimura. Double feedback streaming agent for real-time delivery of media over 3G wireless networks. // *IEEE transactions on multimedia. – Apr 2004. – Vol. 6, issue 2. – PP. 304-314.*
3. Philip A. Chou, Zhourong Miao. Rate-distortion optimized streaming of packetized media. // *IEEE transactions on multimedia. – Apr. 2006. – Vol. 8, issue 2. – PP. 390-404.*
4. Gene Cheung, Wai-Tian Tan, Takeshi Yoshimura. Real-time video transport optimization using streaming agent over 3G wireless networks. // *IEEE transactions on multimedia. – Aug. 2005. – Vol. 7, issue 4. – PP. 777-785.*
5. Невельсон М. Б. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание / М. Б. Невельсон, Р. З. Хасьмински. – М.: Наука, 1972. – 298 с.
6. Поповский В. В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах / В. В. Поповский, В. Ф. Олейник. – Харьков: СМИТ, 2011. – 362 с.
7. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Сейдж Э., Мелс Дж. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
8. Справочник по теории автоматического управления : под ред. Красовского А. А. – М.: Наука, 1982. – 360 с.
9. Уидроу Б. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы применения и построения // *ТИИЭР, 1975. – 69-99 с.*
10. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – М.: Радио и связь, 1986. – 447 с.