

Реализация одиночных источников трафика для задач имитационного моделирования сетей связи железнодорожного транспорта на базе технологии TSN

А. И. Алексеев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

alekseevartem.ig@gmail.com

Аннотация. В работе описана реализация генераторов пакетного трафика для имитационных моделей перспективных сетей связи железнодорожного транспорта на базе Ethernet TSN. Ключевой особенностью технологии TSN является обеспечение гарантированных низких задержек передачи на уровне отдельных потоков трафика. Поэтому для имитационного моделирования сетей TSN представляет интерес генерация и свойства не только агрегированного трафика, но и трафика, создаваемого отдельными источниками. Данная статья посвящена разработке имитационных моделей одиночных источников трафика различного типа – главным образом, типичных для сетей связи железнодорожного транспорта, которые можно применять для исследования процессов передачи информации в пакетных сетях, в частности, в сетях TSN. В работе уделено особое внимание выбору числовых параметров моделей для адекватной имитации реальных источников. В качестве результата представлена реализация разработанных генераторов в среде AnyLogic.

Ключевые слова: *сети, чувствительные ко времени; сети TSN; сети Ethernet; имитационное моделирование; AnyLogic; генераторы трафика*

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основой технологических сетей, обеспечивающих наиболее ответственные виды связи на железнодорожном транспорте, являются системы коммутации каналов синхронной цифровой иерархии. Вместе с тем, предприятия железнодорожного транспорта эксплуатируют крупные сети передачи данных, где за счёт пакетной коммутации пропускная способность распределяется динамически. Однако широко применяемые при построении этих сетей классические технологии, в частности, Ethernet, не дают гарантий доставки пакетов за заданное время, что может привести к их длительным задержкам при изменениях нагрузки сети. Это критично для приложений реального времени (в т.ч. телефонии), что с учётом жестких требований к безопасности на железнодорожном транспорте ограничивает применение коммутации пакетов в технологических сетях [1]. Проблема надёжности классического Ethernet в настоящее время решается в рамках технологии сетей, чувствительных ко времени (TSN – Time-Sensitive Networking), направленной на обеспечение низких задержек и достоверной доставки для критически важного трафика [2]. Это делает актуальным вопрос применимости данной технологии в железнодорожных сетях связи для обеспечения надёжной и своевременной

передачи данных, что, в свою очередь, может позволить эффективнее использовать сетевую инфраструктуру за счёт более широкого внедрения пакетной коммутации.

Настоящая работа посвящена частному вопросу имитационного моделирования сетей TSN, касающемуся генераторов трафика. Так как конечной целью моделирования работы устройств TSN является определение влияния различных механизмов управления трафиком на задержки передачи кадров, корректное задание параметров входного трафика во многом определяет адекватность модели в целом.

II. ВЫБОР МОДЕЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ТРАФИКА

Идея перевода различных видов железнодорожной связи на единую сетевую платформу на базе IP-сетей ранее разрабатывалась в рамках концепции системы интегрированной цифровой технологической связи ОАО «РЖД» (ИЦТС-П). В ней, среди прочего, приведены устройства и системы связи, которые посредством переходных шлюзов предполагается подключать к общей сети передачи данных, что можно использовать как основу для определения типовых источников трафика в сетях железнодорожной связи. В концепции ИЦТС-П выделены следующие функциональные группы сетевых устройств: поездная радиосвязь (ПРС), оперативно-технологическая связь (ОТС), общетехнологическая связь (ОбТС), видеосвязь, видеонаблюдение, сеть передачи данных общетехнологического назначения (СПД-ОТН), оповещение пассажиров, оповещение работников [3].

В общем виде можно выделить три вида устройств-источников, формирующих трафик в названных группах:

- устройства голосовой связи;
- видеокамеры;
- персональные компьютеры.

Именно модели этих устройств будут описаны далее.

III. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТОРОВ ТРАФИКА

Для построения моделей источников используется среда имитационного моделирования AnyLogic, процесс передачи моделируется с применением дискретно-событийного подхода. В рамках него множество агентов, имитирующих кадры Ethernet, обрабатывается блоками, соответствующими различным операциям (постановке в очередь, передаче через выходной порт и др.). В результате на выходе модели формируется поток кадров,

поведение которого учитывает их параметры (размер), интервалы между последовательными посылками, общий характер процесса передачи (например, цикличность). В табл. I представлены используемые блоки AnyLogic, с их графическими обозначениями и кратким описанием функций.

A. Генератор речевого трафика

Типичным средством оцифровки голосового трафика в сетях связи железнодорожного транспорта (в том числе в сетях IP-телефонии) является кодек G.711 [4], формирующий стандартные потоки данных 64 кбит/с. Поэтому именно подобный источник целесообразно рассматривать при построении модели.

Выявленные экспериментально свойства трафика, генерируемого одиночным IP-телефоном с кодеком G.711, подробно описаны в работе [5], посвящённой его моделированию. Поэтому представленные в ней данные предлагается использовать в качестве исходных при построении модели в AnyLogic. Тем не менее, указанные в работе параметры пакетов следует скорректировать. В частности, размер служебных полей кадра Ethernet предлагается считать равным 30 байт (с учётом преамбулы, дополнительных полей заголовка, используемых в сетях с поддержкой TSN, и контрольной суммы) [2], а не 14. Общий размер одного кадра речевого трафика в таком случае составит $30 + 200 = 230$ байт.

Построенная модель генератора речевого трафика в среде AnyLogic представлена на рис. 1. Элементы *Enter* и *Queue* в данном случае используются как эквивалент источника (Source) для преодоления ограничения на количество генерируемых агентов-кадров (реализована маршрутизация, позволяющая многократно пропускать одних и тех же агентов через модель и формировать более объёмную выборку). Блок *Init_Hold* обеспечивает начальную блокировку генератора с последующим запуском в заданный момент времени. В рамках модели время задаётся случайным равномерным распределением на интервале 10–1000 мс, что позволяет создать несколько экземпляров генератора и при симуляции обеспечить их неодновременную работу. Блок *Delay* обеспечивает задержку каждого агента, распределённую нормально с параметрами $\mu = 20$ мс; $\sigma = 0,11$ мс (в соответствии с распределением интервалов между кадрами [5]). Блок *Talk_Hold* пропускает кадры на выход модели в периоды, когда ведётся передача.

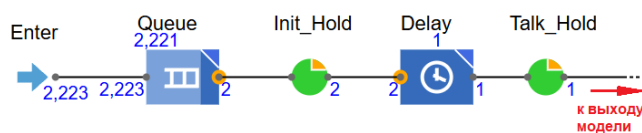


Рис. 1. Модель генератора речевого трафика в AnyLogic

В основном режиме генератор начинает передачу при условии открытия блока *Init_Hold*. После этого возможны циклические переходы из состояния передачи (блок *Talk_Hold* открыт) в состояние молчания (блок *Talk_Hold* закрыт) и наоборот. Интенсивности переходов также заданы согласно [5]: для первого перехода – экспоненциальное распределение ($\lambda = 0,858$ мин.⁻¹); для второго перехода – распределение Вейбулла (параметр формы $\alpha = 0,7$; параметр масштаба $\beta = 22,705$ мин.). Также в модель добавлен режим постоянной передачи, в котором генератор формирует кадры непрерывно.

B. Генератор видеотрафика

В качестве типового источника видеотрафика предлагается рассмотреть IP-камеру с кодеком H.264, который широко применяется для сжатия различной видеoinформации [6][7]. Кодирование выполняется по сложному алгоритму, при котором в потоке выделяются опорные I-кадры, кодируемые независимо, а также P-кадры и B-кадры, кодируемые с использованием ссылок на другие кадры. За счёт ссылок в P- и B-кадрах фиксируются только изменения относительно других кадров (вместо кодирования в виде полноразмерных изображений), чем и достигается сжатие. Алгоритм сжатия и влияние на этот процесс различных факторов подробно изложены в работе [7], посвящённой прогнозированию пропускной способности, требуемой для передачи трафика видеокамер. Предлагаемый в ней подход к оценке размеров отдельных кадров представляется интересным для задачи моделирования источника видеотрафика.

Как показано в названном исследовании, в общем случае размеры видеокадров зависят от большого количества факторов: настроек кодека, разрешения, освещённости, размера и интенсивности движения объектов, параметров камеры, уровня шума и др. Однако авторами предложены выражения для вычисления усреднённых размеров кадров. Для построения модели можно записать (полагая параметр сжатия QR кодека тем же, что в исследовании) для размера I-кадра I , бит:

$$I = I_{const} \times Res = (I_c \times L + N) \times Res, \quad (1)$$

где I_{const} – размер кадра на 1 пиксель, мбит/пикс., складывающийся из: 1) $I_c = 1250$ мбит/пикс. – усреднённая константа для учёта условий съёмки, 2) L – коэффициент для учёта освещённости, и 3) N – уровень шума камеры при заданных условиях, мбит/пикс.; Res – разрешение, кпикс.

Аналогично, размер P-кадра P , бит:

$$P = (ML \times I_{const} \times 0,45 + N) \times Res, \quad (2)$$

где ML – коэффициент для учёта уровня движения; I_{const} , N и Res определяются так же, как для I-кадра.

B-кадры мало отличаются от P-кадров с точки зрения учёта их размера, поэтому можно не рассматривать их отдельно. Помимо размеров видеокадров в модели также следует учесть такие параметры, как частота кадров и

ТАБЛИЦА I. Блоки ANYLOGIC, ИСПОЛЗУЕМЫЕ В МОДЕЛЯХ

Блок	Обозначение	Назначение
Source (Источник)		Генерация новых агентов и введение их в модель
Enter (Вход)		Приём агентов из блоков Exit
Exit (Выход)		Пересылка агентов к блоку Enter
Queue (Очередь)		Накопление и постановка агентов в очередь
Delay (Задержка)		Задержка агентов на определённое время
Hold (Удержание)		Закрытие/открытие пути прохождения агентов

размер группы кадров (GOP), определяющий количество P-кадров между двумя последовательными I-кадрами.

Модель генератора видеотрафика представлена на рис. 2. Верхняя цепочка блоков имитирует генерацию кадров камерой. Один агент, создаваемый блоком *Video_Frames_Src* и передаваемый в блок *VF_Delay*, задерживается там на время, обратное частоте кадров (FPS) и, таким образом, многократно проходит цикл, каждый раз отражая формирование очередного кадра. На выходе *VF_Delay* для кадра вычисляется его размер по формулам (1-2) и переводится в байты. В случае, если это I-кадр, исходя из размера GOP также определяется число последующих P-кадров. Назначение блока *Init_Hold* аналогично таковому в первом генераторе. Кроме того, модель вычисляет количество полных кадров Ethernet N_{Eth} , необходимых для передачи текущего видеокadra, по следующей формуле:

$$N_{Eth} = \left\lceil \frac{S_{VF}}{1460} \right\rceil, \quad (3)$$

где S_{VF} – размер видеокadra, байт; 1460 байт – наибольший размер полезных данных, уместяющихся в кадр Ethernet (за вычетом 40 байт заголовка TCP/IP).

Также проверяется остаток Rem , байт, указывающий на размер нагрузки в последнем кадре Ethernet:

$$Rem = S_{VF} \% 1460. \quad (4)$$

Нижняя цепь имитирует передачу видеотрафика. Блоки *Enter* и *Queue* вновь работают в качестве источника кадров Ethernet. Блок *Talk_Hold* открывается при генерации очередного видеокadra и пропускает, в зависимости от наличия остатка Rem , N_{Eth} или $(N_{Eth} + 1)$ кадров. Размеры всех кадров, кроме последнего, равны 1530 байт, размер последнего – 1530 байт (при $Rem = 0$) или $(Rem + 70)$ байт (при $Rem \neq 0$). Кадры помещаются в буфер передачи *Egress_Buffer*, откуда по одному пересылаются в выходной порт *Egress_Port*.

Численные значения параметров модели, выбранные с опорой на [7], сведены в таблицу II. При этом вместо статического уровня движения предусмотрено его стохастическое задание через усечённое нормальное распределение (для учёта варьирования размеров P-кадров). При этом значения ML_{AVG} из исследования используются как средние для распределения.

С. Генератор трафика данных (ПК)

Разработанная модель генератора трафика данных формирует аperiодический поток кадров нужной интенсивности. Для задания размеров кадров можно использовать данные [8], согласно которым 50% кадров имеют либо максимальный, либо минимальный размер, а для остальных 50% он равномерно распределён между

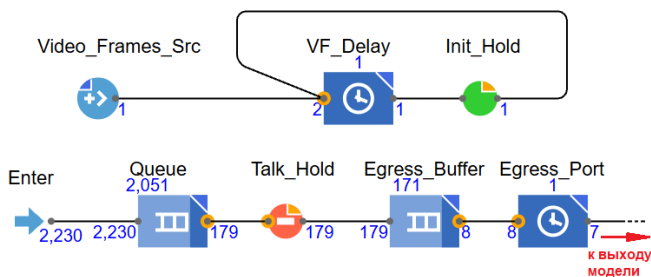


Рис. 2. Модель генератора видеотрафика в AnyLogic

ТАБЛИЦА II. ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРА ВИДЕОТРАФИКА

Параметр	Значение/распределение
Коэффициент учёта освещённости L	1 (высокая освещённость); 0,8 (средняя освещённость); 0,5 (низкая освещённость)
Уровень шума камеры N , мбит/пикс.	2,5 (при $L = 1$); 2,75 (при $L = 0,8$); 22,2 (при $L = 0,5$)
Разрешение Res , пикс.	921,6 (HD, 720p); 2073,6 (Full HD, 1080p); 3686,4 (2K, 1440p)
Усреднённый уровень движения ML_{AVG}	0,15 (высокий уровень движения); 0,065 (средний уровень движения); 0,025 (низкий уровень движения)
Уровень движения ML	Усечённое нормальное распределение ($\mu = ML_{AVG}$; $\sigma = ML_{AVG}/3$; $\min = 0$; $\max = 2 \times ML_{AVG}$)
Частота кадров FPS , к/с	Настраиваемая (по умолчанию 25)
Размер GOP S_{GOP}	Настраиваемый (по умолчанию 62)

этим значениями. Для формирования временных интервалов между кадрами в модели используется схема «On-Off» [9] с переходами генератора между состоянием «On», в котором на выход выдаётся разом большое число кадров, и состоянием «Off», в котором трафик не формируется. В качестве параметра выбирается средний интервал T , который задаёт экспоненциальное распределение времени между входами в состояние «On». После выдачи набора кадров генератор возвращается в состояние «Off». Количество кадров N_F , формируемых в состоянии «On», также выбрано в качестве параметра, имеющего усечённое нормальное распределение с $\min = 1$ и настраиваемыми (μ ; σ). Таким образом, изменяя T и N_F , можно регулировать среднюю выходную нагрузку, сохраняя её случайный характер.

Модель генератора трафика данных представлена на рис. 3. Элементы *Enter*, *Queue* и *Init_Hold* выполняют те же функции, что в предыдущих генераторах. Блок *Talk_Hold* пропускает кадры согласно выбранным параметрам трафика. Блоки *Egress_Buffer* и *Egress_Port*, как и ранее, обеспечивают буферизацию и последовательную выдачу кадров через выходной порт.

IV. ДЕМОНСТРАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Для проверки работы генераторов предлагается имитационный эксперимент, схема которого приведена на рис. 4(а). Для удобства настройки параметров генераторы реализованы в виде пользовательских блоков *VoiceSource*, *VideoSource* и *PCSource*. Также, как было сказано, в модели используется сложная маршрутизация агентов, для чего разработаны блоки *FrameCloud* («облако» кадров) и *UFR* (универсальный приёмник кадров). Первый блок разово создаёт всех агентов и распределяет их по генераторам, а второй возвращает агенты в «облако» для повторного распределения. Блоки *Check* добавлены для сбора статистики и визуализации.

На рис. 4(б) представлен фрагмент временной диаграммы работы генераторов. Из него видно, что речевой трафик представлен кадрами одинакового размера 230 байт, следующими через интервалы порядка 20 мс. Фрагмент видеотрафика начинается с посылки большого числа кадров Ethernet (I-кадра), за которой

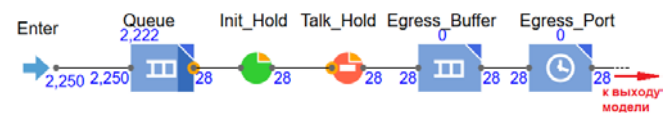


Рис. 3. Модель генератора трафика данных в AnyLogic

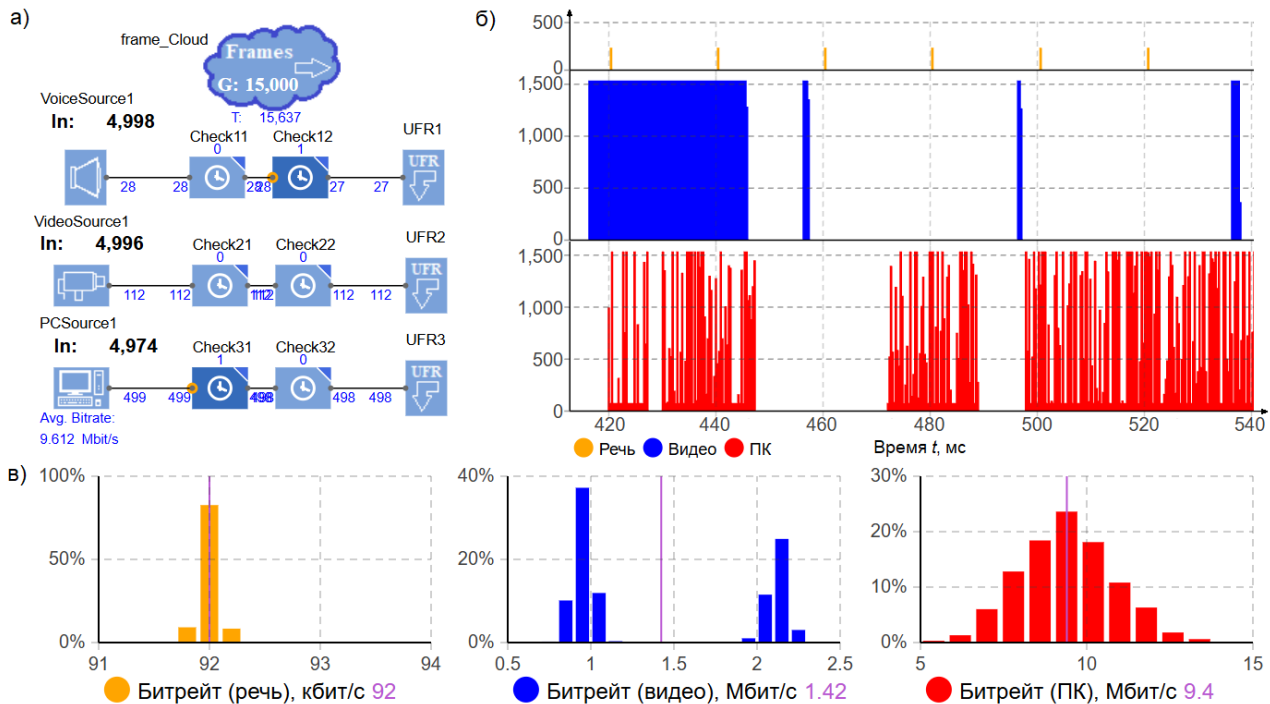


Рис. 4. Имитационный эксперимент: а) схема эксперимента; б) временные диаграммы трафика генераторов; в) битрейт генераторов

следуют три малые посылки (Р-кадры). Интервалы между ними составляют около 40 мс, что соответствует выбранной частоте 25 к./с. Размер 1530 байт имеют все кадры, кроме последнего в каждой посылке, несущего остаток. Трафик данных (ПК) имеет случайный характер, большое количество кадров имеют максимальный (1530) или минимальный (72) размер; видны посылки большого количества кадров подряд и интервалы между ними.

Для интегральной оценки численных параметров генераторов также получены распределения их битрейта. Выборки имеют объём порядка 1000. Как видно из гистограмм на рис. 4(в), средний битрейт речевого трафика равен 92 кбит/с и очень мало отклоняется от этого значения. Данная величина в целом соответствует исходным данным [5] с поправкой на то, что в разработанной модели размер кадра был увеличен. Битрейт видеотрафика измерен для разрешения 720р, высокой освещённости, среднего уровня движения, частоты 25 к./с и размера GOP 62 кадра. Он имеет бимодальное распределение со средним 1,42 Мбит/с и модами около 0,9 и 2,2 Мбит/с. Это связано с тем, что при выбранном размере GOP и частоте в некоторые секунды измерения битрейта передаются только малые Р-кадры, в то время как в другие попадают I-кадры. Среднее значение близко к величине 1,35 Мбит/с, которую можно получить при тех же исходных данных по выражениям из работы [7], использованной при построении модели генератора. Наконец, битрейт трафика данных в среднем равен 9,4 Мбит/с и также хорошо сходится с расчётным значением 9,61 Мбит/с, которое можно найти исходя из заданных параметров ($T = 20$ мс; нормальное распределение N_F с $\mu = 30$, $\sigma = 7$) и среднего размера кадров из распределения [8].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены имитационные модели генераторов трафика сетей Ethernet TSN: описана логика работы моделей, выбраны исходные данные, представлена их реализация и работа в среде AnyLogic.

Имитационный эксперимент показывает, что генераторы корректно функционируют в соответствии с заложенной логикой и заданными числовыми параметрами. В дальнейшем разработанные модели планируется использовать совместно с моделями сетевых устройств для исследования свойств разнородного трафика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кудряшов В.А., Павловский Е.А. Передача дискретных сообщений на железнодорожном транспорте: учеб. пособие. М.: ФГУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. 319 с.
- [2] IEEE Std. 802.1™-2022. IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks – Bridges and Bridged Networks.
- [3] Изучение системы интегрированной цифровой технологической связи ОАО «РЖД» / Практикум по дисциплине «Оперативно-технологическая связь на ж. д. транспорте» – ПГУПС, 2020.
- [4] Лебединский А.К., Павловский А.А., Юркин Ю.В. Автоматическая телефонная связь на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. А.К. Лебединского. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 531 с.
- [5] Канаев А.К., Лукичев М.М., Привалов А.А. Формирование имитационной модели эквивалентного генератора речевого трафика, используемого в пакетно-ориентированных транспортных сетях связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №10. С. 4-12.
- [6] Guoqing Li (et al.) (Intel). Video Traffic Modeling (A Presentation) – 11.11.2013. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.slideserve.com/dong/video-traffic-modeling-powerpoint-presentation> (дата обращения 03.03.2026)
- [7] Edpalm V., Martins A., Maggio M., & Ąrżén K-E. (2018). H.264 Video Frame Size Estimation. (Technical Reports; No. TFRT-7654). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund University.
- [8] Никишин К.И. Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри / К.И. Никишин, Н.Н. Коннов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 1 (17). С. 299–307.
- [9] Поршнев С.В. Математические модели информационных потоков в высокоскоростных магистральных интернет-каналах. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 232 с.