

УДК 004.738.5.057.4: 004.054

ТЕХНОЛОГИЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИЙ СЕТЕВЫХ ПРОТОКОЛОВ И МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Д. И. Ихсанов, Ф. Ф. Иванов*Сургутский государственный университет,
ixsunoff@gmail.com, iff777@yandex.ru*

В статье описан математический аппарат и технология тестирования, позволяющие произвести количественную оценку применения сетевых протоколов и методов интерполяции для передачи и преобразования информации о процессах в системах реального времени.

Ключевые слова: метод интерполяции, сетевой протокол, система реального времени, площадь ошибки, поверхность ошибки, сравнение поверхностей

TECHNOLOGY FOR COMPARISON TESTING OF NETWORK PROTOCOL AND INTERPOLATION METHOD CONFIGURATIONS IN REAL-TIME SYSTEMS

D. I. Ikhsanov, F. F. Ivanov*Surgut State University,
ixsunoff@gmail.com, iff777@yandex.ru*

The article is devoted to the description of the mathematical apparatus and testing techniques, designed to quantify network protocols and interpolation methods, which can be used to transfer and transform information about processes in real-time systems.

Keywords: interpolation method, network protocol, real-time system, error area, error surface, surface comparison.

Введение. При проектировании и разработке систем реального времени (СРВ), одной из задач которых является передача по сети информации о процессах, возникает вопрос выбора сетевого протокола и метода интерполяции. Выбор сетевого протокола и метода интерполяции является важным для надежной передачи данных.

Сетевое программное обеспечение информационных систем может быть оценено с использованием разных критериев в зависимости от типа разрабатываемой СРВ. Например, для оценки сетевой активности систем пакетной передачи данных можно использовать такие критерии, как характеристики каналов передачи данных [1] и показатели качества услуг QoS [2]. Однако данные критерии не позволят исчерпывающе оценить процесс передачи информации в системах реального времени.

В статье будет изложена технология тестирования сетевых протоколов и методов интерполяции при передаче информации между двумя вычислительными узлами сети.

Ограничение на ряд тестируемых процессов. Данная технология нацелена на тестирование обмена информацией о процессах на объекте исследования и/или управления, описательная функция $F(x)$ которых будет дискретизироваться с достаточной частотой.

Под достаточной частотой дискретизации подразумевается соблюдение следствия теоремы Котельникова: любую функцию $H(t)$, состоящую из частот от 0 до f_1 , можно непрерывно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом через $1/2f_1$ секунд [3].

При несоблюдении данного ограничения результаты тестирования могут привести к большим погрешностям.

Конфигурации тестирования. Перед проведением тестирования необходимо определить наборы сетевых протоколов и методов интерполяции для поиска наилучшей пары. Используя декартово произведение наборов сетевых протоколов и методов интерполяции, можно получить матрицу конфигураций (табл. 1).

Таблица 1

Матрица конфигураций

	Метод интерполяции № 1	...	Метод интерполяции № n
Сетевой протокол № 1	Конфигурация (1, 1)	...	Конфигурация (1, n)
...	...	...	...
Сетевой протокол № m	Конфигурация (m , 1)	...	Конфигурация (m , n)

Таким образом, конфигурация для тестирования представляет собой пару «сетевой протокол $\leftrightarrow$ метод интерполяции». По окончании тестирования для каждой конфигурации будет рассчитана численная оценка, позволяющая выбрать среди всех конфигураций оптимальную.

Площадь ошибки как численная оценка конфигурации. Для оценки конфигурации необходимо разработать численный критерий, удовлетворяющий следующим требованиям:

- критерий должен описывать точность восстановления исходного процесса после дискретизации, передачи по сети и интерполяции;
- критерий должен быть чувствителен к временным задержкам, возникающим в процессе передачи из-за нагрузок сетевого оборудования.

В качестве оценки, удовлетворяющей обоим требованиям, применяется понятие «площадь ошибки» s (рис. 1) – численный критерий, представляющий собой площадь между двумя кривыми:

- исходной кривой $F(t)$ – кривой, описывающей реальные значения передаваемого параметра процесса во времени;
- интерполированной $G(t)$ – кривой, описывающей результат восстановления $F(t)$ выбранным методом интерполяции.

Для расчета s необходимо:

- разделить область определения $F(t)$ и $G(t)$ на сегменты $[u_i, v_i]$, такие, что $\forall i \geq 1 \ v_{i-1} = u_i, \forall h \in (u_i, v_i) \ F(h) \neq G(h)$ (рис. 1);

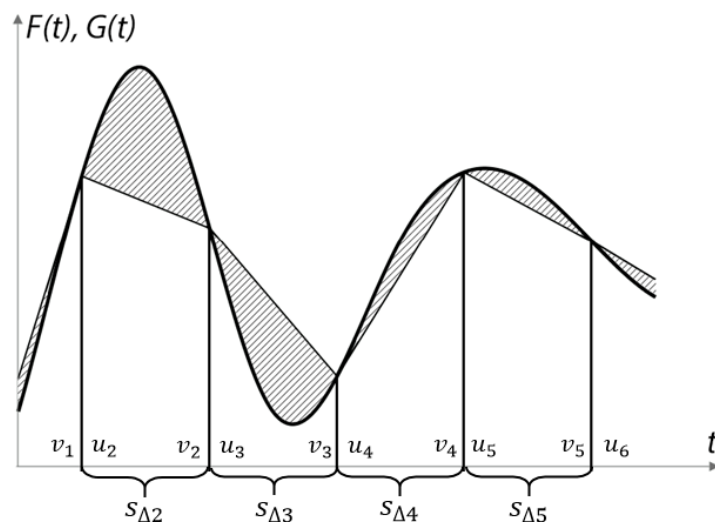


Рис. 1. Разделение области определения на сегменты

- рассчитать площадь ошибки $s_{\Delta i}$ (1) для каждого сегмента $[u_i, v_i]$;

$$s_{\Delta i} = \begin{cases} \int_{u_i}^{v_i} (F(t) - G(t)) dt, \forall h \in [u_i, v_i] F(h) \geq G(h) \\ \int_{u_i}^{v_i} (G(t) - F(t)) dt, \forall h \in [u_i, v_i] G(h) \geq F(h) \end{cases} \quad (1)$$

- рассчитать $s = \sum_i s_{\Delta i}$.

В качестве примера можно рассмотреть случай получения функции $G(t)$ методом линейной интерполяции (рис. 2). В данном примере для восстановления $F(t)$ по протоколу будут переданы значения 5 опорных точек (A, B, C, D, E).

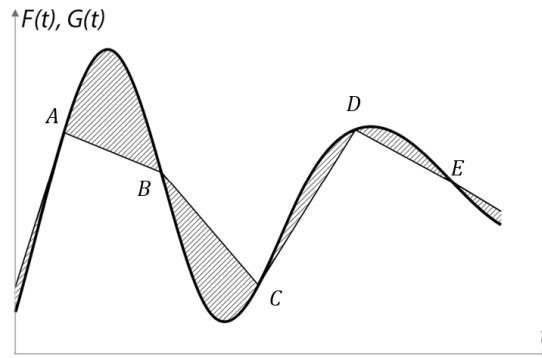


Рис. 2. Площадь ошибки s (заштрихована)

Для достоверной интерполяции $F(t)$ необходимо увеличить количество опорных точек. При увеличении количества опорных точек площадь ошибки кривой $G(t)$ будет стремиться к нулю, что очевидно при использовании линейной интерполяции. Для доказательства данного утверждения в случае применения методов интерполяции полиномами второго и более порядка можно обратиться к результатам исследования точности восстановления сигналов: в результатах исследования сказано, что погрешность восстановления (площадь ошибки) уменьшается с ростом числа опорных точек [4]. Также можно воспользоваться следствием теоремы о погрешности интерполяции, которое утверждает, что с увеличением числа опорных точек погрешность интерполяции (площадь ошибки) уменьшается [5].

Утверждение об уменьшении площади ошибок при увеличении количества опорных точек позволяет говорить о площади ошибки как о характеристике, описывающей точность интерполяции процесса.

Рассмотрим еще один пример линейной интерполяции, в котором информация об одной из опорных точек (C) была передана с задержкой Δt (рис. 3).

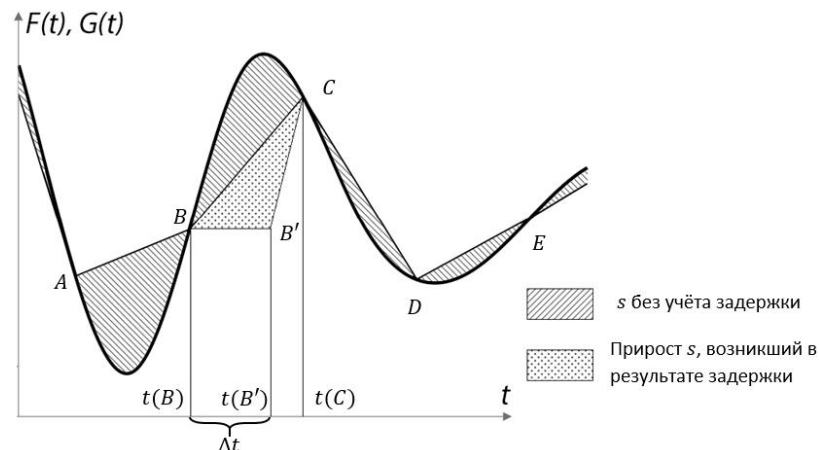


Рис. 3. Площадь ошибки s при задержке передачи информации об опорной точке C

При задержке передачи информации об опорной точке C на Δt секунд значение функции $G(t)$ на интервале $[t(B); t(B) + \Delta t)$ будет равно значению функции $G(t(B))$. Если $\Delta t > t(C) - t(B)$, у функции $G(t)$ будет наблюдаться разрыв функции в точке $t(B) + \Delta t$:

$$\begin{aligned} G(t(B) + \Delta t - 0) &= F(t(B)) \\ G(t(B) + \Delta t + 0) &= F(t(C)). \end{aligned}$$

В случае, если задержка $\Delta t \leq t(C) - t(B)$, линейная интерполяция будет произведена для точек B' и C .

Так как $G(t)$ удовлетворяет следствию теоремы Котельникова, функции $F(t)$ и $G(t)$ не имеют точек пересечения на интервале $(t(B), t(C))$. Из этого следует, что площадь ошибки при задержке Δt на интервале $(t(B), t(C))$ есть сумма площади ошибки при $\Delta t = 0$ и площади треугольника $BB'C$.

Так как площадь треугольника $BB'C$ прямо пропорциональна задержке Δt , можно сказать, что площадь ошибки s увеличивается на интервале $(t(B), t(C))$ с ростом Δt .

Применение среднего значения площади ошибки. При идентичных условиях тестирования одной и той же конфигурации можно получить разные значения s , так как s зависит от набора дискретных значений $F(t)$, по которым строится $G(t)$. Чтобы избавиться от зависимости результатов тестирования от процесса дискретизации $F(t)$, необходимо провести серию тестов (результат каждого теста – значение площади ошибки s_i) и рассчитать среднее значение $\bar{s}$ для совокупности $\{s_1, \dots, s_n\}$, полученной в результате n тестов.

$$\bar{s} = \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_n}{n} \quad (2)$$

где s_i – элемент выборки площадей ошибки, n – размер выборки.

С ростом частоты дискретизации $F(t)$ увеличивается число опорных точек, по которым будет строиться $G(t)$. Согласно результатам исследования точности восстановления сигналов [4], с увеличением числа опорных точек элементы выборки s_i будут стремиться к нулю. Следовательно, при увеличении частоты дискретизации $F(t)$ разность между средними значениями $\bar{s}_1$ (для совокупности $\{s_1, \dots, s_n\}$) и $\bar{s}_2$ (для совокупности $\{s_1, \dots, s_n, s_{n+1}\}$) будет уменьшаться.

Учет пропускной способности и процента потерянных пакетов. Построение поверхности площадей ошибки. При тестировании конфигураций необходимо учитывать возможность ее использования при различных параметрах каналов связи. Для наиболее полного определения характеристик канала были выбраны следующие параметры:

- пропускная способность канала связи (A) как основной параметр канала связи;
- процент потерянных пакетов (B) – статистическая характеристика, описывающая средний процент сетевых пакетов, не достигших получателя, либо отправленных получателю с ошибками.

При моделировании процесса передачи данных необходимо зафиксировать и другие характеристики канала связи: задержку передачи, надежность канала, интенсивность трафика и другие характеристики. При выборе константных характеристик канала передачи данных можно обратиться к статистическим исследованиям [6].

Перед проведением тестирования необходимо определить дискретные значения параметров A и B . Дискретный ряд значений A может содержать элементы больше нуля бит/с, а дискретный ряд B – элементы в диапазоне $[0, 100)\%$.

При подборе дискретных значений A и B необходимо учесть следующие факторы:

- процент потерянных пакетов B является величиной, зависимой от пропускной способности A , в связи с чем необходимо ограничить максимальное значение элементов ряда A до значения, при котором в ряде не наблюдается увеличения процента потерянных пакетов;

- при подборе значений A необходимо определить максимальное значение $A_{\max}$, которое можно получить при использовании конкретной ЛВС.

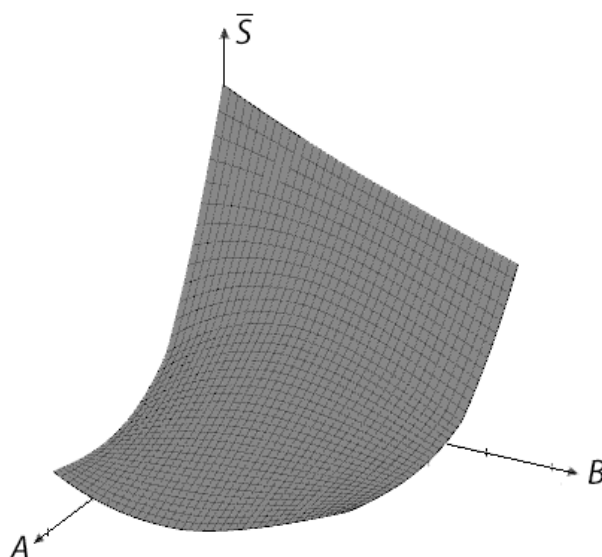
Для полноценного описания работы конфигурации при различных значениях пропускной способности и процента потерянных пакетов необходимо построить матрицу средних значений площадей ошибок (табл. 2).

Таблица 2

**Матрица средних значений площадей ошибок конфигурации
при заданных значениях параметров A и B**

	A_1	...	A_n
B_1	$\bar{S}_{11}$	...	$\bar{S}_{1n}$
...	...	...	...
B_m	$\bar{S}_{m1}$	...	$\bar{S}_{mn}$

Совокупность $\{\bar{S}_{11}, \dots, \bar{S}_{mn}\}$ представляет собой набор дискретных значений функции $\bar{S}(A, B)$. Для восстановления $\bar{S}(A, B)$ по дискретным значениям воспользуемся методом бикубической интерполяции (рис. 4) [7].

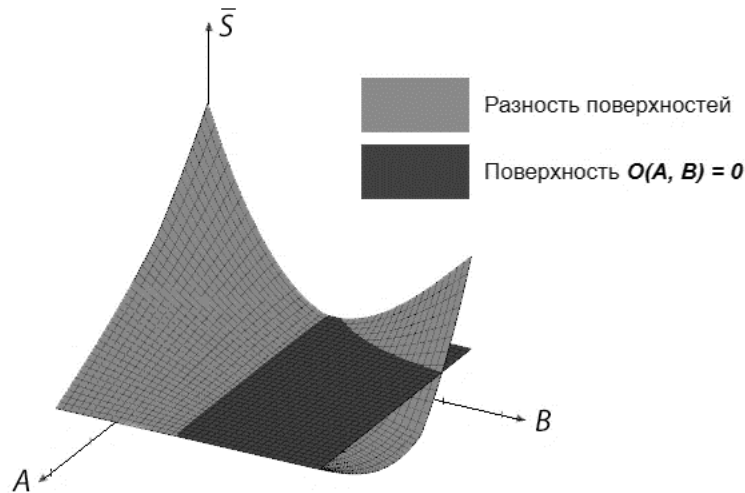
Рис. 4. Поверхность площадей ошибки $\bar{S}(A, B)$

Точность значений $\bar{S}(A, B)$ будет зависеть от размерности матрицы средних значений $\bar{S}$. Стоит отметить, что для увеличения размерности матрицы значительно возрастает объем необходимых предварительных вычислений, в связи с чем необходимо определиться с размерностью матрицы до начала тестирования.

Сравнение конфигураций тестирования по поверхностям площадей ошибок. Рассчитав для N конфигураций k_i ($i = 1..N$) поверхности $\bar{S}_i(A, B)$, необходимо выбрать опорную конфигурацию $k_{\text{оп}}$, по которой будут сравниваться остальные (обозначим как $\bar{S}_{\text{оп}}(A, B)$). В качестве опорной конфигурации можно выбрать любую из рассматриваемых конфигураций тестирования.

Для остальных конфигураций k_i ($i \neq i_{\text{оп}}$) необходимо найти разность поверхностей $\Delta \bar{S}_i(A, B)$ (рис. 6):

$$\Delta \bar{S}_i(A, B) = \bar{S}_{\text{оп}}(A, B) - \bar{S}_i(A, B) \quad (3)$$

Рис. 6. Разность поверхностей $\Delta\bar{S}_i(A, B)$

Разность $\Delta\bar{S}_i(A, B)$ позволяет ответить на вопрос: насколько меньшей площадью ошибки (в среднем) обладает i -ая конфигурация по сравнению с опорной конфигурацией при заданных значениях A и B ?

Далее необходимо найти объёмы фигур V_i , каждая из которых ограничена:

- разностью поверхностей $\Delta\bar{S}_i(A, B)$;
- поверхностью $O(A, B) = 0$;
- областью, удовлетворяющей неравенствам $A_{min} \leq A \leq A_{max}$, $B_{min} \leq B \leq B_{max}$.

Для этого воспользуемся формулой двойного интеграла:

$$V_i = \iint_D \Delta\bar{S}_i(A, B) dA dB, \quad (4)$$

где область D представляет собой прямоугольник, ограниченный неравенствами $A_{min} \leq A \leq A_{max}$, $B_{min} \leq B \leq B_{max}$.

Расчет V_i позволяет агрегировать все значения $\Delta\bar{S}_i(A, B)$ (как положительные, так и отрицательные) в пределах области интегрирования. В результате интегрирования положительные значения $\Delta\bar{S}_i(A, B)$ будут скомпенсированы отрицательными значениями $\Delta\bar{S}_i(A, B)$ (или наоборот).

Точность расчета V_i будет зависеть от выбранного метода численного интегрирования [8]. Аналитический расчет V_i в условиях поставленной задачи невозможен.

Конфигурация k_i , обладающая наибольшим положительным значением V_i , будет считаться предпочтительнее остальных. Однако если все V_i оказались положительными или равны нулю, можно сказать, что предпочтительной является опорная конфигурация $k_{оп}$.

Литература

1. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учеб. для вузов ; 5-е изд. СПб. : Питер, 2016. С. 138–157.
2. Карташевский В. Г., Буранова М. А. Влияние механизмов управления QoS на показатели качества обслуживания мультимедийного трафика сети Internet // T-Comm. 2013. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 13.04.2018).
3. Котельников В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи // Материалы к I Всесоюз. съезду по вопросам технич. реконструкции дела связи и развития слаботоч. пром-сти. М. : Управление связи РККА, 1933. С. 1–19. Репринт ст. в журн. УФН. 2006. № 176 (7). С. 762–770.

4. Поршнева С. В., Кусайкин Д. В. О точности восстановления периодических дискретных сигналов конечной длительности с помощью ряда Котельникова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 11. С. 4–8.
5. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченкова Н. В. Вычислительные методы для инженеров : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1994. С. 302–304.
6. Симаков Д. В., Кучин А. А. Анализ статистических характеристик Интернет трафика в магистральном канале // Т-Comm. 2015. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 14.04.2018).
7. Шикин Е. В., Плис Л. И. Кривые и поверхности на экране компьютера : рук. по сплайнам для пользователей. М. : Диалог-МИФИ, 1996. С. 59–62.
8. Блюмин А. Г., Федотов А. ., Храпов П. В. Численные методы вычисления интегралов и решения задач для обыкновенных дифференциальных уравнений : метод. указания к выполнению лаборатор. работ по курсу «Численные методы». М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. С. 26–41.