
1.2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (1.2.2)

УДК 51-74:519.688.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-190-195

Опыт ускорения анализа сигналов от векторных анализаторов цепей во временной области

С.Н. Михалин

Цель работы — повышение отзывчивости измерительной системы для анализа сверхвысокочастотных сигналов во временной области на основе векторных анализаторов цепей. Цикл измерений состоит из двух стадий: получения частотных отсчетов и выполнения расчетов для перехода во временную область. Длительность первой стадии можно уменьшить только за счет ухудшения динамического диапазона и/или снижения количества анализируемых частотных отсчетов. Уменьшения длительности второй стадии можно достичь распараллеливанием вычислительного процесса и применением быстрых алгоритмов с учетом особенностей исходных данных. Распараллеливание задачи на несколько вычислительных потоков возможно при независимости последних друг от друга, что затруднено при применении итерационных быстрых алгоритмов расчета обратного преобразования Фурье. Последние дополнительно накладывают ограничения на длину преобразования. Несмотря на приведенные сложности, эффективное решение задачи существует. Аналитически показано, что можно достичь кратного сокращения времени расчета пропорционально количеству ядер вычислительного устройства, даже с учетом затрат по организации параллельных вычислений (разделения сигнала на непересекающиеся секции для запуска независимых потоков вычислений и объединения результатов расчета над каждой секцией). Теоретические выводы подкреплены экспериментом, подтверждающим кратное сокращение времени расчета при увеличении количества независимых потоков расчета. Более того, поскольку эксперимент основан только на распараллеливании задачи, то при применении быстрых алгоритмов расчета преобразования Фурье ожидается дополнительное сокращение времени вычислений.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, дискретное преобразование Фурье, параллельные вычисления.

Для цитирования: Михалин С.Н. Опыт ускорения анализа сигналов от векторных анализаторов цепей во временной области // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 190—195. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-190-195.

On the Possibility to Speed Up the Analysis of Signals from Vector Network Analyzers in the Time Domain

S.N. Mikhailin

The aim of the study is to enhance the response of the measurement system for analyzing microwave frequency signals in the time domain based on vector network analyzers. The measurement cycle consists of two stages: obtaining frequency samples (sweeping) and performing calculations for transition to the time domain. The time taken to perform the first stage can be shortened only by degrading the dynamic

range and/or reducing the number of frequency samples analyzed. The time taken to perform the second stage can be reduced by organizing the computational process into a few parallel threads and using fast algorithms with taking into account the features of the source data. A computing task can be organized into parallel threads provided that these threads are independent from one another. However, an attempt to do so encounters difficulties in using iterative fast algorithms for calculating the inverse Fourier transform. In addition, these algorithms impose certain limitations on the transform length. Nonetheless, an effective solution to the problem does exist. It is shown analytically that a several-fold decrease (in proportion to the number of computing device cores) of the computation time is possible, even taking into account the costs of setting up parallel computing (splitting the signal into disjoint sections to run independent computing threads and uniting the calculation results over each section). The theoretical conclusions have been confirmed by an experiment, which demonstrates a several-fold reduction in the computation time with increasing the number of independent computation threads. Moreover, since the experiment is based only on dividing the task into several computation threads, additional shortening of the calculation time is expected in using fast Fourier transform computing algorithms.

Key words: vector network analyzer, discrete Fourier transform, parallel computing.

For citation: Mikhlin S.N. On the Possibility to Speed Up the Analysis of Signals from Vector Network Analyzers in the Time Domain. Bulletin of MPEI. 2023;5:190—195. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-190-195.

Введение

В радиотехнике большую роль играет возможность измерения параметров высокочастотных трактов распространения сигнала. Данная задача эффективно решается с помощью векторных анализаторов цепей (ВАЦ) [1], которые предоставляют комплексные величины коэффициентов отражения S_{mn} от подключенного к его входам (портам) устройства и прохождения электромагнитной волны через него S_{nm} в некотором частотном диапазоне (n, m — номера портов). Достигается это свипированием (от англ. Sweep) по линейному или логарифмическому закону в ограниченном частотном диапазоне. В идеале сверхвысокочастотный (СВЧ) генератор на дискретном наборе частот по очереди формирует синусоидальные колебания, контролируемые на входе и выходе исследуемого устройства (по величинам амплитуды и фазы). Таким образом, результат является дискретной комплексной функцией (или их набором). Например, если к анализатору подключен СВЧ-фильтр функция S_{nm} характеризует его амплитудно-частотную (АЧХ — модуль функции) и фазочастотную (ФЧХ — аргумент функции) характеристики.

Настройка СВЧ-устройств состоит в использовании подстроечных элементов (предусматриваются конструктивно) для управления характером (формой, параметрами) АЧХ (реже ФЧХ) с целью получения желаемого вида характеристики, наблюдаемой на анализаторе. В ряде случаев, например, для установки требуемого коэффициента связи между частями (звеньями) устройства или отделения эхо-сигналов, или для определения положения неоднородностей (дефектов) в линиях частотное представление может быть неэффективным. Более подходящим и удобным в этом случае считается временная область. Таким образом, возникает задача пересчета измеренных частотных отсчетов дискретного сигнала (спектра) во временную область с последующей интерполяцией результата.

Теоретически данная задача решается с помощью обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ). Однако конечный частотный диапазон получаемого от ВАЦ сигнала обычно довольно узок и содержит сравнительно малое количество отсчетов (ина-

че время измерения может оказаться неприемлемым). Проблема в том, что с одной стороны, при настройке необходимо контролировать широкую полосу, т. е. границы свипирования должны быть больше полосы пропускания устройства (в частности, содержать области, где должны обеспечиваться заданные условия подавления сигналов). С другой, — количество дискретных отсчетов в выбранной полосе свипирования необходимо делать максимально большим, чтобы получать достаточно детализированный результат (так, это важно для звеньев со слабой связью). Это приводит к увеличению длительности цикла измерения и быстрому росту требований к производительности вычислительного устройства, и, как результат, к проблемам осуществления настройки, поскольку реакцию измеряемой системы на какое-либо «подстроечное воздействие» необходимо видеть в реальном времени, а не спустя несколько десятков или даже сотен секунд. Субъективно это время не должно превышать пары секунд. Например, длительность свипирования по 201 точке при полосе фильтра промежуточной частоты 1 кГц у ВАЦ Agilent N5230A по данным документации при отключенной коррекции ошибок и без вывода результата на экран составляет 272,5 мс. Этот же показатель у Anritsu серии 7838G — порядка 325 мс (включая коррекцию и вывод на экран). Указанное время растет пропорционально количеству точек измерения.

Цикл анализа сигнала состоит из двух составляющих: получения данных (свипирования) и их обработки. Формально есть еще этап вывода результатов на экран, но анализ этого вопроса выходит за рамки данной работы. Уменьшить первую составляющую трудно по техническим причинам [1], поскольку требуется сформировать установившийся режим работы СВЧ-генератора на заданной частоте и получить отклик устройства с учетом проблем направленности, рассогласованности тракта и т. п. Другими словами, конечный пользователь ВАЦ не может повлиять на длительность свипирования, кроме как уменьшить количество точек анализа и/или жертвовать точностью измерения частотных отсчетов (например, увеличивая полосу фильтра промежуточной частоты). Длительность вто-

рой составляющей связана с производительностью вычислительного устройства, а также эффективностью применяемых алгоритмов. Замена узлов вычислительной системы ВАЦ на более производительные модели сопряжена с очевидными трудностями — для установки более нового (производительного) процессора следует заменить почти весь бортовой компьютер, в том числе: блок питания, систему охлаждения и операционную систему. Это, в свою очередь, как минимум, приводит к проблемам совместимости аппаратного и программного обеспечения СВЧ-части, а также возможным конструктивным несоответствиям. Поэтому на практике данный путь фактически нельзя реализовать как по техническим, так и по экономическим причинам. Таким образом, для уменьшения времени обработки измеренных данных остается применять более эффективные методы обработки.

Типовые анализаторы цепей обычно имеют штатные средства прямого расчета ОДПФ для анализа сигналов во временной области [2]. Дополнительно для учета проблем конечности выборки в них применяют окна анализа и линейную интерполяцию. Из-за указанных выше ограничений в совокупности с трудностями модернизации ВАЦ достичь хороших результатов с помощью такого встроенного математического аппарата трудно. Получаемый результат носит скорее качественный характер.

Высокую вычислительную нагрузку при больших длинах преобразования можно уменьшить применением быстрых алгоритмов расчета ОДПФ. Однако количество анализируемых точек в ВАЦ обычно принадлежит ряду чисел: 401, 801, 1601 и т. д. — являющихся нечетными числами, позволяющими получить «ровную» величину шага по частоте (это связано с реализацией СВЧ-генератора ВАЦ): $\Delta f = \frac{F_2 - F_1}{N - 1}$, где F_1 , F_2 — начальная и конечная частоты свипирования; N — количество частотных отсчетов. Иными словами, при таком выборе N нет возможности применять хорошо известные быстрые алгоритмы ОДПФ (в частности, алгоритм Кули–Тьюки, который требует длины преобразования равной степени двойки) [3].

Выходом из ситуации может быть применение идей гнездового алгоритма. Заметим, что $800 = 25 \cdot 2^5$, $1600 = 25 \cdot 2^6$ и т. д. (отбрасывание одной частотной точки можно считать несущественным). Другими словами, вместо расчета одного преобразования Фурье с «неудобной длиной» можно рассчитать множество коротких преобразований, но уже с «удобной длиной», соответствующей требованиям быстрых алгоритмов. Это одновременно позволит применить типовой быстрый алгоритм расчета ОДПФ и воспользоваться многоядерностью современных вычислительных средств. Действительно, быстрые эффективные алгоритмы являются рекурсивными, т. е. предполагают последовательные вычисления и, таким образом, не способ-

ствуют использованию нескольких «вычислительных ядер» одновременно. Поэтому на многоядерном процессоре применение рекурсивных алгоритмов к длинной выборке сигнала менее эффективно, чем многократное применение их же к коротким выборкам того же сигнала. Это справедливо даже с учетом накладных расходов, связанных с разделением исходного сигнала на секции и объединением результатов вычислений над каждой секцией в конечный результат.

Рассмотрим ОДПФ сигнала $\underline{X}(\omega_k)$, полученного от ВАЦ:

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} \underline{X}(\omega_k) e^{j\omega_k t_n},$$

где ω_k — дискретные значения частот, на которых получены значения комплексного спектра $\underline{X}(\omega_k)$; t_n — дискретные моменты времени, на которых рассчитывается импульсная характеристика системы $x(t)$; n — номер дискретного отсчета, $n \in [0, N - 1]$; N — количество отсчетов (на единицу меньше количества отсчетов, полученных от ВАЦ).

Представим длину преобразования N в виде произведения целых чисел, одно из которых K может быть величиной вида 2^k , $k \in \mathbb{Z}$, что позволит применить простейший и самый популярный быстрый алгоритм расчета ОДПФ: $N = MK$, тогда M будет иметь смысл количества секций (параллельных вычислительных процессов). Перепишем выражение ОДПФ (формально — входной сигнал разделим на непересекающиеся секции):

$$x(t_n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} \underline{X}(\omega_{Km+k}) e^{j\omega_{Km+k} t_n}.$$

Получаемые от ВАЦ частотные отсчеты $\underline{X}(\omega_k)$ являются равноотстоящими друг от друга в заданной полосе частот от F_1 до F_2 в количестве $N + 1$ отсчет, поэтому их частоту запишем в виде

$$\begin{aligned} \omega_{Km+k} &= 2\pi \left(F_1 + \frac{F_2 - F_1}{N} (Km + k) \right) = \\ &= 2\pi F_1 + 2\pi \frac{F_2 - F_1}{N} Km + 2\pi \frac{F_2 - F_1}{N} k. \end{aligned}$$

С учетом сказанного и обозначения отсчетов дискретного сигнала $\underline{X}(k) = \underline{X}(\omega_k)$:

$$x(t_n) = e^{j2\pi F_1 t_n} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi \frac{F_2 - F_1}{M} m t_n} \sum_{k=0}^{K-1} \underline{X}(Km + k) e^{j2\pi \frac{F_2 - F_1}{MK} k t_n}.$$

В соответствии со свойствами преобразования Фурье, умножение сигнала во временной области на комплексную экспоненту $e^{j2\pi F_1 t_n}$ соответствует сдвигу по частоте, т. е. можно ввести обозначение $F_b = F_2 - F_1$ (ниже частоты F_1 в силу ограниченности выборки подразумевается отсутствие информационно значимых составляющих сигнала, что позволяет полосовой сигнал рассматривать как низкочастотный):

$$x(t_n) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi \frac{F_1}{M} m t_n} \sum_{k=0}^{K-1} \underline{X}(Km+k) e^{j2\pi \frac{F_2}{MK} k t_n}.$$

(*) Если нижняя граница F_1 не определена задачей в явном виде, то в СВЧ-технике ее можно выбрать из физических соображений, например через понятие критической длины волны. Отметим, что величина F_1 выражается целым числом (при работе с ВАЦ нет возможности задавать начальную частоту диапазона свипирования долями герца), аналогично выглядит значение F_2 . Более того, в силу введенных обозначений величина F_2 нацело делится на N .

Наконец, результат $x(t_n)$ является дискретной функцией, значения которой — равноотстоящие на временной оси точки $t_n = n t_s$, где шаг t_s — период дискретизации. По теореме отсчетов частота дискретизации (т.е. величина t_s^{-1}) должна быть строго в два раза больше верхней частоты сигнала. В силу произвольности положим $t_s^{-1} = 2\beta F_2$, где $\beta \geq 1$ (равенство допускается, поскольку частотная точка F_2 исключена из выборки), поэтому n -й отсчет во временной области определяется формулой:

$$x(n) = \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\frac{\pi m}{M\beta} n} \sum_{k=0}^{K-1} \underline{X}(Km+k) e^{j\frac{\pi k}{MK\beta} n}.$$

Рассмотрим комплексный сигнал

$$\sum_{k=0}^{K-1} \underline{X}(Km+k) e^{j\frac{\pi k}{K\beta} n},$$

в котором деление на M в аргументе экспоненты можно считать масштабированием по времени. Тогда записанное выражение — есть ОДПФ длины K от m -го блока частотных отсчетов — секции (при этом \underline{X} — массив чисел, выборку из которого можно осуществлять в произвольном порядке для удобного хода вычислений). Если целое число $\beta > 1$, то коэффициент интерпретируется как дополнение выборки нулями (при этом количество операций не возрастает, так как за пределами выборки сигнал полагается равным нулю). Отметим, что получаемый с ВАЦ спектр является односторонним, чтобы сигнал во временной области был действительным, необходимо модуль спектра сделать симметричным, а аргумент — антисимметричным, т.е. положить $\underline{X}(-k) = \underline{X}^*(k)$.

Оценим выигрыш от распараллеливания, т.е. вычисления M ОДПФ длины K по сравнению с расчетом одного ОДПФ длины MK . Принимая во внимание, что сложность прямой реализации расчета ОДПФ определяется порядком квадрата длины преобразования [4], а трудоемкость сборки результатов параллельных вычислений — порядком M , получим

$$\eta = \frac{(MK)^2}{M + MK^2} = \frac{M}{1 + K^{-2}}.$$

Другими словами, доля распараллеливаемой работы стремится к единице при $K \gg 1$, поэтому, согласно закону Амдала, добавление очередного параллельного процесса оправдано, по крайней мере до M включительно. В общем случае применение проанализированного способа реализации ОДПФ позволяет уменьшить длительность цикла анализа, т.е. повысить отзывчивость измерительной системы на основе ВАЦ при настройке СВЧ-устройств во временной области за счет значительного сокращения времени расчета. Полученный выигрыш, сохраняя комфортные условия анализа, можно направить на увеличение количества частотных отсчетов и/или для расширения частотного диапазона.

Для демонстрации возможностей выполнен численный эксперимент по оценке производительности как функции количества потоков расчета ОДПФ. Поскольку при фиксированной длине исходных данных ($N = 1600$ отсчетов) обеспечить загрузку всех ядер задачей расчета ОДПФ с длиной кратной степени двойки не представляется возможным, то от использования быстрых алгоритмов на этапе сравнения быстродействия пришлось отказаться. Очевидно, что при их применении в конкретном случае длин преобразования будет получен дополнительный выигрыш по времени расчета, например, для алгоритма Кули–Тьюки, — пропорционально $K/\log_2 K$ раз [3, 4] (конкретно для случая $N = 25 \cdot 64$ дополнительный выигрыш будет десятикратным).

В таблице представлены нормированные длительности выполнения разработанного программного кода по расчету ОДПФ от количества параллельно выполняемых потоков: теоретически ожидаемые данные (величины, обратно пропорциональные количеству потоков) и результаты эксперимента, схема которого показана на рисунке.

Поскольку ВАЦ N5230A содержит однопоточный процессор, то для получения зависимости времени решения задачи от числа потоков он не подходит, поэтому для выполнения расчетов в ходе эксперимента использована внешняя вычислительная машина (ВМ) с 6-ядерным процессором Intel Xeon с технологией Hyper Threading под управлением операционной системы Windows. Поскольку последняя имеет множество фоновых процессов, то при загрузке всех физических ядер процессора их влияние заметно сказалось на результатах измерения. Это можно видеть в таблице в виде скачка разницы между теоретическими и экспериментальными данными, начиная с нагрузки в шесть потоков. Подобное поведение согласуется с официальными данными компании Intel (по данным <https://www.intel.co.uk/content/www/uk/en/gaming/resources/hyper-threading.html> (дата обращения 30.11.2022)): технология Hyper Threading может обеспечить прирост производительности процессора лишь до 30% по сравнению со случаем ее отключения. Несмотря на указанные факторы, отчетливо видна и прогнозируемая положительная динамика по сокращению времени расчета

Нормированная эффективность расчета ОДПФ

Поток	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Теория	1,0	0,5000	0,3333	0,2500	0,2000	0,167	0,143	0,125	0,111	0,100
Эксперимент	1,0	0,4995	0,3329	0,2503	0,2006	0,184	0,165	0,150	0,133	0,121
[Теория - эксперимент]		0,0005	0,0004	0,0003	0,0006	0,017	0,022	0,025	0,022	0,021



Структурная схема экспериментальной установки для измерения эффективности расчета ОДПФ

пропорционально росту количества потоков расчета ОДПФ, также ожидаемо большее в случае применения быстрых алгоритмов расчета ОДПФ в каждой секции.

Время расчета ОДПФ 1600 точек одним потоком в ходе эксперимента составило 228,5 мс, повторяемость временных интервалов — в пределах 0,2 мс. Производительность измеряли с помощью типовой функции QueryPerformanceCounter(). С целью минимизации влияния кэширования данных и запущенных процессов, служб Windows выполняли две серии расчетов по 20 автоматических запусков подряд в каждой, из них выбирали два лучших результата, которые затем усредняли. Такой подход обеспечил повторяемость и стабильность серий измерений на хорошем уровне (при имеющихся условиях проведения эксперимента). Кратко сформулированные общеизвестные принципы измерения длительности работы программы можно найти в [5], более полно в [6].

Более перспективным выглядит выполнение расчетов с помощью специальных вычислителей, в частности — CUDA-ядер современных графических ускорителей [7]. Их возможностей хватает для быстрого расчета ОДПФ даже без применения специальных быстрых алгоритмов вплоть до длин ОДПФ, размер которых не превосходит размера локальной памяти ядра для хранения данных.

С точки зрения ВАЦ, как законченного устройства, путь добавления внешнего вычислительного устрой-

ства (например, графического ускорителя) выглядит привлекательным в свете своей простоты реализации. Однако стадии копирования данных в память ускорителя и вывод из него результатов могут оказаться соизмеримыми с длительностью самих вычислений.

Заключение

Рассмотрен подход к быстрой реализации ОДПФ по получаемым от ВАЦ данным (дискретному набору частотных отсчетов) с целью уменьшения длительности цикла анализа сигнала во временной области при условии «неудобных» размеров блоков исходных данных. За счет хорошей распараллеливаемости задачи расчета ОДПФ удастся в разы сократить время анализа сигнала. Это, в конечном итоге, обеспечивает повышение отзывчивости измерительной системы при настройке СВЧ-систем, т. е. сокращение временного интервала от момента оказания подстроечных действий до отображения на экране соответствующих результатов.

Проведены серии численных экспериментов, подтверждающих теоретические ожидания даже без применения специализированного процессора и применения быстрых алгоритмов расчета ОДПФ. Независимость процесса расчета ОДПФ от характеристик и настроек СВЧ-части прибора позволяет распространить результаты на другие модели ВАЦ.

Литература

1. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. М.: Издат. дом МЭИ, 2009.
2. Дансмор Д.П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: Техносфера, 2018.
3. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989.
4. Леус В.А. О распараллеливании дискретного преобразования Фурье // Математическое моделирование. 1990. Т. 2. № 4. С. 88—96.
5. Лохматов С.Ю., Светлов С.В., Калач Г.П. Методы измерения времени работы программы // Современные научные исследования и инновации.

References

1. Khibel' M. Osnovy Vektornogo Analiza Tsepey. M.: Izdat. Dom MEI, 2009. (in Russian).
2. Dansmor D.P. Nastol'naya Kniga Inzhenera. Izmereniya Parametrov SVCH-ustroystv s Ispol'zovaniem Peredovykh Metodik Vektornogo Analiza Tsepey. M.: Tekhnosfera, 2018. (in Russian).
3. Bleykhut R. Bystrye Algoritmy Tsifrovoy Obrabotki Signalov. M.: Mir, 1989. (in Russian).
4. Leus V.A. O Rasparallelivanii Diskretnogo Preobrazovaniya Fur'e. Matematicheskoe Modelirovanie. 1990; 2;4:88—96. (in Russian).
5. Lokhmatov S.Yu., Svetlov S.V., Kalach G.P. Metody Izmereniya Vremeni Raboty Programmy. Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii. 2017;5 [Elek-

2017. № 5 [Электрон. ресурс] <https://web.snauka.ru/issues/2017/05/83188> (дата обращения 08.12.2022).

6. **Lilja D.J.** Measuring Computer Performance: a Practitioner's Guide. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

7. **Боресков А.В. и др.** Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA. М.: Изд-во Московского ун-та, 2015.

tron. Resurs] <https://web.snauka.ru/issues/2017/05/83188> (Data Obrashcheniya 08.12.2022). (in Russian).

6. **Lilja D.J.** Measuring Computer Performance: a Practitioner's Guide. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

7. **Boreskov A.V. i dr.** Parallel'nye Vychisleniya na GPU. Arkhitektura i Programmnaya Model' CUDA. M.: Izd-vo Moskovskogo Un-ta, 2015. (in Russian).

Сведения об авторе:

Михалин Сергей Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных машин, систем и сетей НИУ «МЭИ», e-mail: MikhalinSN@mpei.ru

Information about author:

Mikhalin Sergey N. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Computing Machines, Systems and Networks Dept., NRU MPEI, e-mail: MikhalinSN@mpei.ru

Статья поступила в редакцию: 16.01.2023

The article received to the editor: 16.01.2023

Статья принята к публикации: 06.06.2023

The article has been accepted for publication: 06.06.2023