

Лекция 12: Проектирование распределённых приложений

Часть первая: технические вопросы

Юрий Литвинов
y.litvinov@spbu.ru

05.05.2025

Распределённые системы

- ▶ Компоненты приложения находятся в компьютерной сети
- ▶ Взаимодействуют через обмен сообщениями
- ▶ Основное назначение — работа с общими ресурсами
- ▶ Особенности
 - ▶ Параллельная работа
 - ▶ Независимые отказы
 - ▶ Отсутствие единого времени

Частые заблуждения при проектировании распределённых систем

- ▶ Сеть надёжна
- ▶ Задержка (latency) равна нулю
- ▶ Пропускная способность бесконечна
- ▶ Сеть безопасна
- ▶ Топология сети неизменна
- ▶ Администрирование сети централизовано
- ▶ Передача данных «бесплатна»
- ▶ Сеть однородна

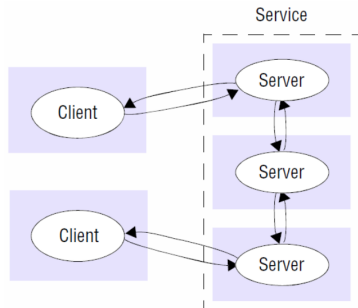
© https://en.wikipedia.org/wiki/Fallacies_of_distributed_computing

Виды взаимодействия

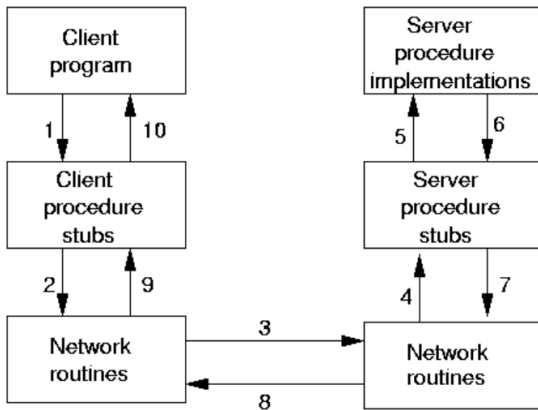
- ▶ Межпроцессное взаимодействие
- ▶ Удалённые вызовы
 - ▶ Протоколы вида «запрос-ответ»
 - ▶ Удалённые вызовы процедур (remote procedure calls, RPC)
 - ▶ Удалённые вызовы методов (remote method invocation, RMI)
- ▶ Неявное взаимодействие
 - ▶ Распределённая общая память
 - ▶ Очереди сообщений
 - ▶ Модель «издатель-подписчик»

Варианты размещения

- ▶ Разбиение сервисов по нескольким серверам
- ▶ Мобильный код
- ▶ Мобильный агент
- ▶ Кеширование



RPC

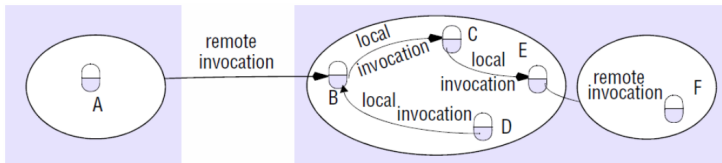


Прозрачность RPC-вызовов

- ▶ Изначальная цель — максимальная похожесть на обычные вызовы
 - ▶ Location and access transparency
- ▶ Удалённые вызовы более уязвимы к отказам
 - ▶ Нужно понимать разницу между отказом сети и отказом сервиса
 - ▶ Exponential backoff
- ▶ Клиенты должны знать о задержках при передаче данных
 - ▶ Возможность прервать вызов
- ▶ Семантика вызова
 - ▶ Exactly once
 - ▶ At most once
 - ▶ At least once

RMI

- ▶ Локальные и удалённые объекты
- ▶ Интерфейсы удалённых объектов
- ▶ Ссылки на удалённые объекты
 - ▶ Как параметры или результаты удалённых вызовов
- ▶ Умеют исключения



Protocol buffers

protobuf

- ▶ Механизм сериализации-десериализации данных
- ▶ Компактное бинарное представление
- ▶ Декларативное описание формата данных, генерация кода для языка программирования
 - ▶ Поддерживается Java, Python, Kotlin, Objective-C, C++, Go, Ruby, C#, Dart
- ▶ Бывает v2 и v3, с некоторыми синтаксическими отличиями
- ▶ Хитрый протокол передачи,
<https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/encoding>
 - ▶ До 10 раз компактнее XML

Пример

Файл .proto:

```
syntax = "proto3";
```

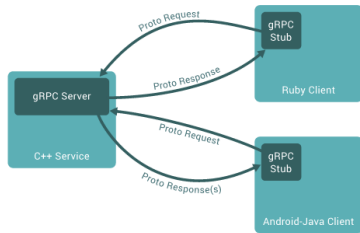
```
message Person {  
    string name = 1;  
    int32 id = 2;  
    string email = 3;  
}
```

Файл .java:

```
Person john = Person.newBuilder()  
    .setId(1234)  
    .setName("John Doe")  
    .setEmail("jdoe@example.com")  
    .build();  
output = new FileOutputStream(args[0]);  
john.writeTo(output);
```

gRPC

- ▶ Средство для удалённого вызова (RPC)
- ▶ Работает поверх protobuf
- ▶ Тоже от Google, поддерживает те же языки, что и protobuf
- ▶ Весьма популярен



Технические подробности

- ▶ Сервисы описываются в том же .proto-файле, что и протокол protobuf-a
- ▶ В качестве типов параметров и результатов — message-и protobuf-a

```
service RouteGuide {  
  rpc GetFeature(Point) returns (Feature) {}  
  rpc ListFeatures(Rectangle) returns (stream Feature) {}  
  rpc RecordRoute(stream Point) returns (RouteSummary) {}  
  rpc RouteChat(stream RouteNote) returns (stream RouteNote) {}  
}
```

© <https://grpc.io/docs/languages/java/basics/>

- ▶ Сборка — плагином grpc к protoc

Реализация сервиса на Java

```
private static class RouteGuideService extends RouteGuideGrpc.RouteGuideImplBase {
    ...
    @Override
    public void getFeature(Point request, StreamObserver<Feature> responseObserver) {
        responseObserver.onNext(checkFeature(request));
        responseObserver.onCompleted();
    }

    @Override
    public void listFeatures(Rectangle request, StreamObserver<Feature> responseObserver) {
        for (Feature feature : features) {
            ...
            int lat = feature.getLocation().getLatitude();
            int lon = feature.getLocation().getLongitude();
            if (lon >= left && lon <= right && lat >= bottom && lat <= top) {
                responseObserver.onNext(feature);
            }
        }
        responseObserver.onCompleted();
    }
}
```

Реализация сервиса на Java (2)

```

@Override
public StreamObserver<RouteNote> routeChat(
    final StreamObserver<RouteNote> responseObserver) {
    return new StreamObserver<RouteNote>() {
        @Override
        public void onNext(RouteNote note) {
            List<RouteNote> notes = getOrCreateNotes(note.getLocation());
            for (RouteNote prevNote : notes.toArray(new RouteNote[0])) {
                responseObserver.onNext(prevNote);
            }
            notes.add(note);
        }
        @Override
        public void onError(Throwable t) {
            logger.log(Level.WARNING, "routeChat cancelled");
        }
        @Override
        public void onCompleted() {
            responseObserver.onCompleted();
        }
    };
}

```

Реализация клиента на Java (1)

```
public RouteGuideClient(String host, int port) {  
    this(ManagedChannelBuilder.forAddress(host, port).usePlaintext(true));  
}
```

```
public RouteGuideClient(ManagedChannelBuilder<?> channelBuilder) {  
    channel = channelBuilder.build();  
    blockingStub = RouteGuideGrpc.newBlockingStub(channel);  
    asyncStub = RouteGuideGrpc.newStub(channel);  
}
```

Реализация клиента на Java (2)

```

public void getFeature(int lat, int lon) {
    Point request = Point.newBuilder().setLatitude(lat).setLongitude(lon).build();
    Feature feature;
    try {
        feature = blockingStub.getFeature(request);
    } catch (StatusRuntimeException e) {
        warning("RPC failed: {0}", e.getStatus());
        return;
    }
    if (RouteGuideUtil.exists(feature)) {
        info("Found feature called \"{0}\" at {1}, {2}",
            feature.getName(),
            RouteGuideUtil.getLatitude(feature.getLocation()),
            RouteGuideUtil.getLongitude(feature.getLocation()));
    } else {
        info("Found no feature at {0}, {1}",
            RouteGuideUtil.getLatitude(feature.getLocation()),
            RouteGuideUtil.getLongitude(feature.getLocation()));
    }
}

```


Веб-сервисы

- ▶ Каждый веб-сервис — отдельная система, представляющая что-то вроде RPC/RMI интерфейса
- ▶ Сложные приложения как интеграция веб-сервисов
- ▶ HTTP-запрос для выполнения команды
 - ▶ Асинхронное взаимодействие
 - ▶ Ответ-запрос
 - ▶ Событийные схемы
- ▶ XML или JSON как основной формат сообщений
 - ▶ SOAP/WSDL/UDDI
 - ▶ XML-RPC
 - ▶ REST

SOAP-ориентированные сервисы

- ▶ Simple Object Access Protocol
- ▶ Web Services Description Language
- ▶ Universal Discovery, Description and Integration



SOAP-сообщение

```
<env:Envelope xmlns:env="http://www.w3.org/2003/05/soap-envelope">
  <env:Header>
    <n:alertcontrol xmlns:n="http://example.org/alertcontrol">
      <n:priority>1</n:priority>
      <n:expires>2001-06-22T14:00:00-05:00</n:expires>
    </n:alertcontrol>
  </env:Header>
  <env:Body>
    <m:alert xmlns:m="http://example.org/alert">
      <m:msg>Get up at 6:30 AM</m:msg>
    </m:alert>
  </env:Body>
</env:Envelope>
```

WSDL-описание

```
<message name="getTermRequest">  
  <part name="term" type="xs:string"/>  
</message>
```

```
<message name="getTermResponse">  
  <part name="value" type="xs:string"/>  
</message>
```

```
<portType name="glossaryTerms">  
  <operation name="getTerm">  
    <input message="getTermRequest"/>  
    <output message="getTermResponse"/>  
  </operation>  
</portType>
```

Достоинства SOAP-based сервисов

- ▶ Автоматический режим описания сервисов
- ▶ Автоматическая поддержка описаний SOAP-клиентом
- ▶ Автоматическая валидация сообщений
 - ▶ Валидность xml
 - ▶ Проверка по схеме
 - ▶ Проверка SOAP-сервером
- ▶ Работа через HTTP
 - ▶ Хоть через обычный GET

Недостатки SOAP-based сервисов

- ▶ Огромный размер сообщений
- ▶ Сложность описаний на клиенте и сервере
- ▶ Один запрос — один ответ
 - ▶ Поддержка транзакций на уровне бизнес-логики
- ▶ Сложности миграции при изменении описания

Windows Communication Foundation

- ▶ Платформа для создания веб-сервисов
- ▶ Часть .NET Framework, начиная с 3.0
 - ▶ Сейчас замещается ASP.NET Web APIs
- ▶ Умеет WSDL, SOAP и т.д., очень конфигурируема
- ▶ Автоматическая генерация заглушек на стороне клиента
- ▶ ABCs of WCF: Address, Binding, Contract



© <http://www.c-sharpcorner.com>

Пример, описание контракта

```
[ServiceContract(Namespace = "http://Microsoft.ServiceModel.Samples")]
```

```
public interface ICalculator
```

```
{
```

```
    [OperationContract]
```

```
    double Add(double n1, double n2);
```

```
    [OperationContract]
```

```
    double Subtract(double n1, double n2);
```

```
    [OperationContract]
```

```
    double Multiply(double n1, double n2);
```

```
    [OperationContract]
```

```
    double Divide(double n1, double n2);
```

```
}
```


Пример, реализация контракта

```
public class CalculatorService : ICalculator
{
    public double Add(double n1, double n2)
        => n1 + n2;

    public double Subtract(double n1, double n2)
        => n1 - n2

    public double Multiply(double n1, double n2)
        => n1 * n2;

    public double Divide(double n1, double n2)
        => n1 / n2;
}
```

Пример, self-hosted service

```
Uri baseAddress = new Uri("http://localhost:8000/ServiceModelSamples/Service");  
ServiceHost selfHost = new ServiceHost(typeof(CalculatorService), baseAddress);
```

```
try {  
    selfHost.AddServiceEndpoint(typeof(ICalculator), new WSHttpBinding(),  
        "CalculatorService");  
  
    ServiceMetadataBehavior smb = new ServiceMetadataBehavior();  
    smb.HttpGetEnabled = true;  
    selfHost.Description.Behaviors.Add(smb);  
  
    selfHost.Open();  
    Console.WriteLine("The service is ready. Press <ENTER> to terminate service.");  
    Console.ReadLine();  
  
    selfHost.Close();  
} catch (CommunicationException ce) {  
    Console.WriteLine($"An exception occurred: {ce.Message}");  
    selfHost.Abort();  
}
```

Пример, клиент

▶ Генерация заглушки:

```
svcutil.exe /language:cs /out:generatedProxy.cs /config:app.config^  
http://localhost:8000/ServiceModelSamples/service
```

▶ Клиент:

```
var client = new CalculatorClient();
```

```
double value1 = 100.00D;
```

```
double value2 = 15.99D;
```

```
double result = client.Add(value1, value2);
```

```
Console.WriteLine($"Add({value1},{value2}) = {result}");
```

```
client.Close();
```

Пример, конфигурация клиента

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<configuration>
  <startup>
    <!-- specifies the version of WCF to use-->
    <supportedRuntime version="v4.0" sku=".NETFramework,Version=v4.5,Profile=Client" />
  </startup>
  <system.serviceModel>
    <bindings>
      <!-- Uses wsHttpBinding-->
      <wsHttpBinding>
        <binding name="WSHttpBinding_ICalculator" />
      </wsHttpBinding>
    </bindings>
    <client>
      <!-- specifies the endpoint to use when calling the service -->
      <endpoint address="http://localhost:8000/ServiceModelSamples/Service/CalculatorService"
        binding="wsHttpBinding" bindingConfiguration="WSHttpBinding_ICalculator"
        contract="ServiceReference1.ICalculator" name="WSHttpBinding_ICalculator">
        <identity>
          <userPrincipalName value="migree@redmond.corp.microsoft.com" />
        </identity>
      </endpoint>
    </client>
  </system.serviceModel>
</configuration>
```

Representational State Transfer (REST)

- ▶ Самая популярная сейчас архитектура веб-сервисов
- ▶ Передача всего необходимого в запросе
 - ▶ Нельзя хранить состояние сессии
- ▶ Стандартизованный интерфейс, очень простые запросы
- ▶ Стандартные протоколы (в основном поверх HTTP)
- ▶ Обычно JSON как формат сериализации
- ▶ Кеширование

Интерфейс сервиса

- ▶ Коллекции
 - ▶ <http://api.example.com/customers/>
- ▶ Элементы
 - ▶ <http://api.example.com/customers/17>
- ▶ HTTP-методы (GET, POST, PUT, DELETE), стандартная семантика, стандартные коды ошибок
- ▶ Передача параметров прямо в URL
 - ▶ http://api.example.com/customers?user=me&access_token=ASFQF

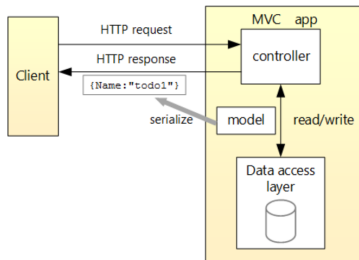
Пример, Google Drive REST API

- ▶ GET <https://www.googleapis.com/drive/v2/files> — список всех файлов
- ▶ GET <https://www.googleapis.com/drive/v2/files/fileId> — метаданные файла по его Id
- ▶ POST <https://www.googleapis.com/upload/drive/v2/files> — загрузить новый файл
- ▶ PUT <https://www.googleapis.com/upload/drive/v2/files/fileId> — обновить файл
- ▶ DELETE <https://www.googleapis.com/drive/v2/files/fileId> — удалить файл

ASP.NET

- ▶ Вообще — серверный фреймворк для разработки веб-приложений под .NET
- ▶ Появился в 2002 году (вместе с самим .NET), переписан под .NET Core в 2016
- ▶ Кроссплатформенный, open-source, лицензия MIT
- ▶ Имеет механизм быстрого создания REST-сервисов

ASP.NET Web APIs



© <https://docs.microsoft.com/en-us/aspnet/core/tutorials/first-web-api>

Пример

Полный код сервиса!

```
var builder = WebApplication.CreateBuilder(args);  
var app = builder.Build();  
  
var summaries = new[] {  
    "Freezing", "Bracing", "Chilly", "Cool", "Mild",  
    "Warm", "Balmy", "Hot", "Sweltering", "Scorching"  
};  
  
app.MapGet("/weatherforecast", () => {  
    var forecast = Enumerable.Range(1, 5).Select(index =>  
        new WeatherForecast  
        (  
            DateTime.Now.AddDays(index),  
            Random.Shared.Next(-20, 55),  
            summaries[Random.Shared.Next(summaries.Length)]  
        )).ToArray();  
    return forecast;  
});  
  
app.Run();  
  
internal record WeatherForecast(DateTime Date,  
    int TemperatureC, string? Summary) {  
    public int TemperatureF => 32 + (int)(TemperatureC / 0.5556);  
}
```

Очереди сообщений

- ▶ Используются для гарантированной доставки сообщений
 - ▶ Даже если отправитель и получатель доступны в разное время
 - ▶ Локальное хранилище сообщений на каждом устройстве
- ▶ Реализуют модель «издатель-подписчик», но могут работать и в режиме «точка-точка»
- ▶ Как правило, имеют развитые возможности маршрутизации, фильтрации и преобразования сообщений
 - ▶ Разветвители, агрегаторы, преобразователи порядка

RabbitMQ

- ▶ Сервер и клиенты системы надёжной передачи сообщений
 - ▶ Сообщение посылается на сервер и хранится там, пока его не заберут
 - ▶ Продвинутые возможности по маршрутизации сообщений
- ▶ Реализует протокол AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), но может использовать и другие протоколы
- ▶ Сервер написан на Erlang, клиентские библиотеки доступны для практически чего угодно



Пример, отправитель

```
using System;
using RabbitMQ.Client;
using System.Text;

var factory = new ConnectionFactory() { HostName = "localhost" };
using var connection = factory.CreateConnection();
using var channel = connection.CreateModel();
channel.QueueDeclare(queue: "hello", durable: false, exclusive: false,
    autoDelete: false, arguments: null);

string message = "Hello World!";
var body = Encoding.UTF8.GetBytes(message);

channel.BasicPublish(exchange: "", routingKey: "hello",
    basicProperties: null, body: body);
```

Пример, получатель

```
using RabbitMQ.Client;
using RabbitMQ.Client.Events;
using System;
using System.Text;

var factory = new ConnectionFactory() { HostName = "localhost" };
using var connection = factory.CreateConnection();
using var channel = connection.CreateModel();
channel.QueueDeclare(queue: "hello", durable: false, exclusive: false, autoDelete: false, arguments: null);

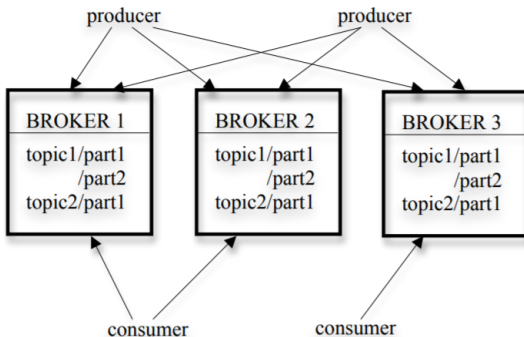
var consumer = new EventingBasicConsumer(channel);
consumer.Received += (model, ea) =>
{
    var body = ea.Body;
    var message = Encoding.UTF8.GetString(body);
    Console.WriteLine("[x] Received {0}", message);
};
channel.BasicConsume(queue: "hello", autoAck: true, consumer: consumer);
```

Apache Kafka

- ▶ Несколько другой подход к очередям: лог событий
 - ▶ Сообщение посылается на сервер и хранится там вечно (ну, почти), получатель при обработке его не удаляет
 - ▶ Индекс текущего сообщения хранит сам получатель, может отмотать назад
 - ▶ Подход «Event Sourcing» — не храним состояние, храним набор событий, позволяющих его получить
 - ▶ Гораздо лучше с распределённостью
- ▶ Быстрее RabbitMQ, лучше масштабируется
- ▶ Хуже с маршрутизацией (по идее), немного сложнее в настройке



Apache Kafka, устройство



© J. Kreps et al., Kafka: a Distributed Messaging System for Log Processing, 2011

- ▶ Топики — каналы, куда можно писать
- ▶ Разделы — логические куски топиков
- ▶ Брокеры — отдельные сервера, балансируют нагрузку
- ▶ Сегменты — файлы на диске, куски разделов, хранящиеся у брокеров

Пример, отправитель

```
using Confluent.Kafka;
```

```
var config = new ProducerConfig { BootstrapServers = "localhost:9092" };
```

```
using var p = new ProducerBuilder<Null, string>(config).Build();
```

```
try
```

```
{
```

```
    var deliveryResult = await p.ProduceAsync(  
        "test-topic", new Message<Null, string> { Value = "test" });
```

```
}
```

```
catch (ProduceException<Null, string> e)
```

```
{
```

```
    Console.WriteLine($"Delivery failed: {e.Error.Reason}");
```

```
}
```

Пример, получатель

```
using Confluent.Kafka;
```

```
var conf = new ConsumerConfig {  
    GroupId = "test-consumer-group",  
    BootstrapServers = "localhost:9092",  
    AutoOffsetReset = AutoOffsetReset.Earliest  
};
```

```
using var consumer = new ConsumerBuilder<Ignore, string>(conf).Build();  
consumer.Subscribe("my-topic");
```

```
var cts = new CancellationTokenSource();  
Console.CancelKeyPress += (_, e) => {  
    e.Cancel = true;  
    cts.Cancel();  
};
```

```
try {  
    while (true) {  
        var consumeResult = consumer.Consume(cts.Token);  
        Console.WriteLine($"Consumed message '{consumeResult.Message.Value}'.");  
    }  
} catch (OperationCanceledException) {  
    consumer.Close();  
}
```