南开大学

Nankai University

南　　开　　大　　学

计 算 机 学 院

数据安全

SEAL 应用实践

穆禹宸　　2012026

年级：2020 级

专业：信息安全、法学双学位班

指导教师：刘哲理

2023 年 3 月 18 日

目录

一、 实验名称

SEAL 应用实践

二、 实验要求

参考教材实验 2.3，实现将三个数的密文发送到服务器完成 $x^3 + y * z$ 的运算。

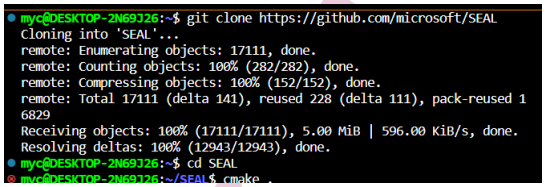
三、 实验过程

(一) 环境配置

首先，从 github 上拉取开源的 SEAL 库，代码如下所示：

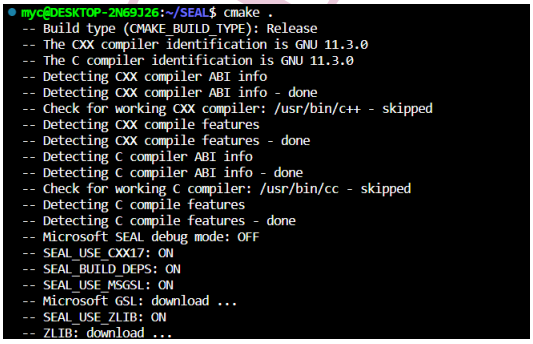
```
git clone https://github.com/microsoft/SEAL
```

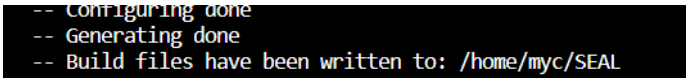
结果如下所示：



然后输入 cmake .

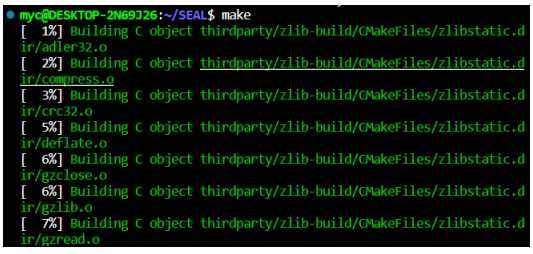
过程及结果如下所示：

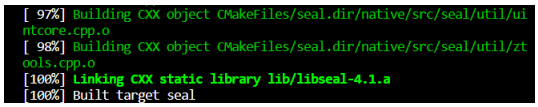




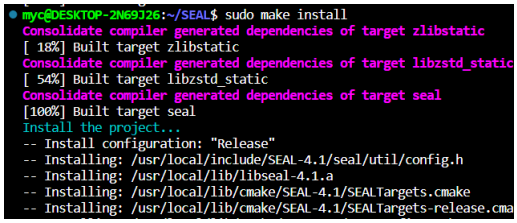
然后输入 make .

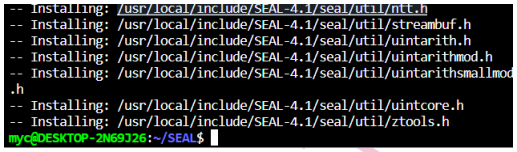
过程和结果如下所示：





最后输入 sudo make install
过程和结果如下所示:





此时 SEAL 库已经顺利安装了。在本过程中我没有遇到困难。

(二) 实验代码

1. 前置部分

首先，仿照参考代码进行初始设置，导入 examples.h 头文件，并生成 x,y,z 三个向量

```cpp
#include "examples.h"
#include <vector>
using namespace std;
using namespace seal;
#define N 3
int main()
{

    // 客户端的视角：要进行计算的数据
    vector<double> x, y, z;
    x = { 1.0, 2.0, 3.0 };
    y = { 2.0, 3.0, 4.0 };
    z = { 3.0, 4.0, 5.0 };
    cout<<" 原始向量 x 是：  "<<endl;
    print_vector(x);
    cout<<" 原始向量 y 是：  "<<endl;
    print_vector(y);
    cout<<" 原始向量 z 是：  "<<endl;
    print_vector(z);
    cout<<endl;
    ...
}
```

然后构建参数容器 parms，CKKS 有三个重要参数：

1. poly_module_degree(多项式模数)
2. coeff_modulus（参数模数）
3. scale（规模）

这里我的设置都没有进行改动，均为官方 SEAL 库推荐的设置，如下所示：

```cpp
// 构建参数容器 parms
EncryptionParameters parms(scheme_type::ckks);
// 这里的参数都使用官方建议的
size_t poly_modulus_degree = 8192;
parms.set_poly_modulus_degree(poly_modulus_degree);
parms.set_coeff_modulus(CoeffModulus::Create(poly_modulus_degree, { 60, 40, 40,
↪  60 }));
double scale = pow(2.0, 40);
```

对于参数的选择，虽然是选择了官方的建议，但是也要搞清楚其原理。在官方文档的 examples 之中，其解释的其原理如下：

假设 CKKS 密码中的比例为 S，并且当前 coeff_modulus（用于密码）中最后一个素数为 P。重新调整到下一个级别会将比例更改为 S/P，并像通常在模量转换时那样从 coeff_modulus 中删除 P. 素数数量限制了可以执行多少次重新调整操作，因此限制了计算机器深度。

当然，我们可以自由选择初始比例。一种好策略是将初期规模 S 和系数组合 P_i 设置得非常接近彼此。如果在乘法之前密码具有规模 S，则在乘法之后它们具有规模 S^2，在重新调整之后具有规模 S^2/P_i. 如果所有 P_i 都接近于 S，则 S^2/P_i 再次接近于 S 。这样我们就稳定了各个阶段上的标度值靠近 S 。通常对于深度为 D 的环路, 我们需要 D 次重排, 也就是说, 我们需要能够从系数组合中移除 D 个素数. 当系数组合只剩下一个素数时, 剩余素必须大于 S 几位以保持明文小数字点前面部分不变。

因此，一般的好策略是按以下方式选择 CKKS 方案的参数：

（1）将 60 位质数作为 coeff_modulus 中的第一个质数。这样在解密时可以获得最高精度；

（2）选择另一个 60 位质数作为 coeff_modulus 的最后一个元素，因为它将用作特殊质数，并且应该与其他质数中最大的那个一样大；

（3）选择中间质数彼此接近。

我们使用 CoeffModulus :: Create 生成适当大小的素数。请注意，我们的 coeff_modulus 总共有 200 位，在 poly_modulus_degree 上限之下这是因为 CoeffModulus :: MaxBitCount(8192) 返回的是 **218**。

因此，这也就是官方建议的 60, 40, 40, 60 的来历。

我们选择初始比例为 2^40。在最后一级，这使我们保留了 60-40=20 位小数点前的精度，并且足够（大约 10-20 位）小数点后的精度。由于我们的中间质数是 40 位（实际上它们非常接近 2^40），因此我们可以像上面描述的那样实现比例稳定化。

然后构建各模块，代码如下所示：

```
// 用参数生成 CKKS 框架 context
SEALContext context(parms);

// 构建各模块
// 生成公钥、私钥和重线性化密钥
KeyGenerator keygen(context);
auto secret_key = keygen.secret_key();
PublicKey public_key;
keygen.create_public_key(public_key);
RelinKeys relin_keys;
keygen.create_relin_keys(relin_keys);
// 构建编码器，加密模块、运算器和解密模块
// 注意加密需要公钥 pk；解密需要私钥 sk；编码器需要 scale
Encryptor encryptor(context, public_key);
Evaluator evaluator(context);
Decryptor decryptor(context, secret_key);
CKKSEncoder encoder(context);
```

这里构建了一个 SEALContext 对象 context(parms)。**这是一个重要的类，它检查我们刚刚设置的参数的有效性和属性。**

然后对三个向量进行编码和加密

```
// 对向量 x、y、z 进行编码
Plaintext xp, yp, zp;
encoder.encode(x, scale, xp);
encoder.encode(y, scale, yp);
encoder.encode(z, scale, zp);

// 对明文 xp、yp、zp 进行加密
Ciphertext xc, yc, zc;
encryptor.encrypt(xp, xc);
encryptor.encrypt(yp, yc);
encryptor.encrypt(zp, zc);
```

2. 实验核心代码

我将本次实验拆分为如下五个步骤:

1. 计算 $x * x$，即 x^2，将结果存入变量 x2 之中
2. 计算 $1.0 * x$，结果保存在 xc 之中
3. 将新的 xc 与变量 x2 相乘, 即 $1.0 * x * x^2$, 得到 x^3，将结果存入变量 x3 之中
4. 计算 $y * z$，将结果存入变量 yz 之中
5. 将 x3+yz，即计算 $x^3 + y * z$，完成实验要求

下面说明具体代码:

步骤一

首先，计算 x^2，较为简单，代码如下所示:

```
// 步骤 1，计算 x^2
        print_line(__LINE__);
    cout << " 计算 x^2 ." << endl;
    Ciphertext x2;
    evaluator.multiply(xc, xc, x2);
    // 进行 relinearize 和 rescaling 操作
    evaluator.relinearize_inplace(x2, relin_keys);
    evaluator.rescale_to_next_inplace(x2);
    // 然后查看一下此时 x^2 结果的 level
    print_line(__LINE__);
    cout << " + Modulus chain index for x2: "
<< context.get_context_data(x2.parms_id())->chain_index() << endl;
```

这里我们说明以下 level 这个概念。

在 Microsoft SEAL 中，一组加密参数（不包括随机数生成器）通过其 256 位哈希唯一标识。该哈希称为“parms_id”，可以随时轻松访问和打印。只要更改任何一个参数，哈希就会发生变化。

当从给定的 EncryptionParameters 实例创建 SEALContext 时，Microsoft SEAL 自动创建所谓的“模量切换链”，即从原始集合派生出来的其他加密参数链。模量切换链中的参数与原始

参数相同，除了系数模量大小沿着链向下减小之外。更确切地说，在链中每个参数集都试图从前一个集合删除最后一个系数模量素数；直到该参数集不再有效为止（例如 plain_modulus 大于剩余 coeff_modulus）。可以轻松遍历整个链并访问所有参数集。此外，链中每个参数集都有一个“chain index”，指示其在链中的位置，因此最后一个设置具有索引 0. 如果某组加密参数或携带这些加密参数的对象比另一组较高，则说明它们处于较高级别上，并且其 chain index 更大即早期出现在该条线上。

链接列表是由 SEALContext :: ContextData 对象构成，每个节点可通过特定加密算法 (poly_modulus_degree 保持不变但 coeff_modulus 变化) 的 parms_id 进行标识，在创建 SEALContext 时进行独特预计算并存储于其中。整个链接列表可以很容易地通过 SEALContext 随时访问。

由于模量切换链，5 个质数的顺序很重要。最后一个质数有特殊含义，并称其为“特殊质数”。因此，在模量切换链中设置的第一个参数是唯一涉及到特殊质数的参数。所有密钥对象（如 SecretKey）都在此最高级别创建。所有数据对象（如 Ciphertext）只能处于较低级别。特殊素数应该尽可能大地与其他 coeff_modulus 中最大的素数相同，尽管这不是严格要求。

“模量切换”是一种将密文参数向下更改的技术。函数 Evaluator :: mod_switch_to_next 始终切换到链中下一个级别，而 Evaluator :: mod_switch_to 则切换到与给定 parms_id 相对应的链中下一个参数集。但是，在链条上无法向上切换。

步骤二

然后，计算 $1.0 * x$，这一步的目的是因为 x^2 和 xc 此时的 level 已经不同，因此需要通过与乘法单位元“1”相乘，将 xc 的 level 从 2 变为 1 。

```
    // 步骤 2, 计算 1.0*x
    // 此时 xc 本身的层级应该是 2, 比 x^2 高, 因此这一步解决层级问题
    print_line(__LINE__);
    cout << " + Modulus chain index for xc: "
<< context.get_context_data(xc.parms_id())->chain_index() << endl;
    // 因此, 需要对 x 进行一次乘法和 rescaling 操作
        print_line(__LINE__);
    cout << " 计算 1.0*x ." << endl;
    Plaintext plain_one;
    encoder.encode(1.0, scale, plain_one);
    // 执行乘法和 rescaling 操作:
    evaluator.multiply_plain_inplace(xc, plain_one);
    evaluator.rescale_to_next_inplace(xc);
    // 再次查看 xc 的层级, 可以发现 xc 与 x^2 层级变得相同
    print_line(__LINE__);
    cout << " + Modulus chain index for xc new: "
<< context.get_context_data(xc.parms_id())->chain_index() << endl;
    // 那么, 此时 xc 与 x^2 层级相同, 二者可以相乘了
```

CKKS 中的乘法会导致密文中的尺度增长。任何密文的尺度都不能太接近 coeff_modulus 的总大小，否则密文就没有足够的空间来存储缩放后的明文。CKKS 方案提供了“重新调整”功能，可以减小尺度并稳定尺度扩展。

rescale 是一种模数切换操作。与模数切换相同，它从 coeff_modulus 中删除最后一个质数，并将密文按所删除质数进行缩放。通常情况下，我们希望完全控制如何改变比例，在 CKKS 方

案中更常见地使用精心选择的系数模量素数。**因此，每一次乘法都要做一次 rescale**

步骤三

然后，计算 $1.0 * x * x^2$，也就是把前两个步骤得到的结果相乘

```
    // 步骤 3，计算 x^3，即 1*x*x^2
    // 先设置新的变量叫 x3
        print_line(__LINE__);
    cout << " 计算 1.0*x*x^2 ." << endl;
    Ciphertext x3;
    evaluator.multiply_inplace(x2, xc);
    evaluator.relinearize_inplace(x2,relin_keys);
    evaluator.rescale_to_next(x2, x3);
    // 此时观察 x^3 的层级
    print_line(__LINE__);
cout << " + Modulus chain index for x3: "
<< context.get_context_data(x3.parms_id())->chain_index() << endl;
```

步骤四

然后，计算 $y * z$，这一步是直接相乘，较为简单，代码如下所示:

```
    // 步骤 4，计算 y*z
    print_line(__LINE__);
    cout << " 计算 y*z ." << endl;
    Ciphertext yz;
    evaluator.multiply(yc, zc, yz);
    // 进行 relinearize 和 rescaling 操作
    evaluator.relinearize_inplace(yz, relin_keys);
    evaluator.rescale_to_next_inplace(yz);
    // 然后查看一下此时 y*z 结果的 level
    print_line(__LINE__);
    cout << " + Modulus chain index for yz: "
<< context.get_context_data(yz.parms_id())->chain_index() << endl;
```

步骤五

此时，我们分别得到了变量 x3（x^3）和变量 yz（$y * z$），它们的 level 和 scale 都是不同的，此时他们无法直接相加。为了解决这两个问题，需要进行如下操作:

```
// 注意，此时问题在于 scales 的不统一，可以直接重制。
    print_line(__LINE__);
    cout << "Normalize scales to 2^40." << endl;
    x3.scale() = pow(2.0, 40);
    yz.scale() = pow(2.0, 40);
    // 输出观察，此时的 scale 的大小已经统一了!
    print_line(__LINE__);
    cout << " + Exact scale in 1*x^3: " << x3.scale() << endl;
    print_line(__LINE__);
    cout << " + Exact scale in  y*z: " << yz.scale() << endl;

    // 但是，此时还有一个问题，就是我们的 x^3 和 yz 的层级还不统一!
    // 在官方 examples 中，给出了一个简便的变换层级的方法，如下所示:
    parms_id_type last_parms_id = x3.parms_id();
    evaluator.mod_switch_to_inplace(yz, last_parms_id);
    print_line(__LINE__);
    cout << " + Modulus chain index for yz new: "
<< context.get_context_data(yz.parms_id())->chain_index() << endl;
```

这里的原理同样来自于官方样例:

由于 P_2 和 P_1 非常接近于 2^40，我们可以简单地“欺骗” Microsoft SEAL 并将比例尺设置为相同。将 $1.0 * x * x^2$ 的比例尺更改为 2^40 仅意味着我们通过 $2^120/({P_2}^2 * P_1)$ 缩放 $1.0 * x * x^2$ 的值，这非常接近于 1。这不应导致任何明显的错误。注意，这只是其中一种方法，但是这种方法最简单。

而对于 level 的切换，更加简单，CKKS 支持模数切换，就像 BFV 方案一样，使我们能够在不需要时切换系数模数的部分。

最后，计算 $x^3 + y * z$

```
// 步骤 5, x^3+y*z
        print_line(__LINE__);
    cout << " 计算 x^3+y*z ." << endl;
    Ciphertext encrypted_result;
    evaluator.add(x3, yz, encrypted_result);
```

注意，加法并不需要 rescale 操作。因此直接相加后直接处理即可!

3. 客户端解码

将计算完成的结果从服务器重新返回客户端，客户端进行解码，并进行结果展示，代码如下所示:

```
// 计算完毕，服务器把结果发回客户端
Plaintext result_p;
decryptor.decrypt(encrypted_result, result_p);

// 注意要解码到一个向量上
vector<double> result;
encoder.decode(result_p, result);

// 输出结果
print_line(__LINE__);
cout << " 结果是: " << endl;
print_vector(result, 3 /*precision*/);

return 0;
```

至此，本次实验所编写的代码和整个流程全部结束。

实验完整代码如下所示:

实验完整代码

```
#include "examples.h"
#include <vector>
using namespace std;
using namespace seal;
#define N 3
int main()
{

    // 客户端的视角: 要进行计算的数据
    vector<double> x, y, z;
    x = { 1.0, 2.0, 3.0 };
    y = { 2.0, 3.0, 4.0 };
    z = { 3.0, 4.0, 5.0 };
    cout<<"原始向量x是: "<<endl;
    print_vector(x);
    cout<<"原始向量y是: "<<endl;
    print_vector(y);
    cout<<"原始向量z是: "<<endl;
    print_vector(z);
    cout<<endl;
    // 构建参数容器 parms
    EncryptionParameters parms(scheme_type::ckks);
    // 这里的参数都使用官方建议的
    size_t poly_modulus_degree = 8192;
    parms.set_poly_modulus_degree(poly_modulus_degree);
    parms.set_coeff_modulus(CoeffModulus::Create(poly_modulus_degree, { 60,
        40, 40, 60 }));
    double scale = pow(2.0, 40);
```

```
28
29      // 用参数生成 CKKS 框架 context
30      SEALContext context(parms);
31
32      // 构建各模块
33      // 生成公钥、私钥和重线性化密钥
34      KeyGenerator keygen(context);
35      auto secret_key = keygen.secret_key();
36      PublicKey public_key;
37      keygen.create_public_key(public_key);
38      RelinKeys relin_keys;
39      keygen.create_relin_keys(relin_keys);
40      // 构建编码器, 加密模块、运算器和解密模块
41      // 注意加密需要公钥 pk; 解密需要私钥 sk; 编码器需要 scale
42      Encryptor encryptor(context, public_key);
43      Evaluator evaluator(context);
44      Decryptor decryptor(context, secret_key);
45      CKKSEncoder encoder(context);
46
47      // 对向量 x、y、z 进行编码
48      Plaintext xp, yp, zp;
49      encoder.encode(x, scale, xp);
50      encoder.encode(y, scale, yp);
51      encoder.encode(z, scale, zp);
52
53      // 对明文 xp、yp、zp 进行加密
54      Ciphertext xc, yc, zc;
55      encryptor.encrypt(xp, xc);
56      encryptor.encrypt(yp, yc);
57      encryptor.encrypt(zp, zc);
58
59
60      /*
61      下面进入本次实验的核心内容
62      计算$x^3+y*z$
63      */
64      // 步骤1, 计算x^2
65          print_line(__LINE__);
66      cout << "计算 x^2 ." << endl;
67      Ciphertext x2;
68      evaluator.multiply(xc, xc, x2);
69      // 进行 relinearize 和 rescaling 操作
70      evaluator.relinearize_inplace(x2, relin_keys);
71      evaluator.rescale_to_next_inplace(x2);
72      // 然后查看一下此时x^2结果的level
73      print_line(__LINE__);
74      cout << " + Modulus chain index for x2: "
75  << context.get_context_data(x2.parms_id())->chain_index() << endl;
```

```
76
77      // 步骤2, 计算1.0*x
78      // 此时xc本身的层级应该是2, 比x^2高, 因此这一步解决层级问题
79      print_line(__LINE__);
80      cout << " + Modulus chain index for xc: "
81  << context.get_context_data(xc.parms_id())->chain_index() << endl;
82      // 因此, 需要对 x 进行一次乘法和 rescaling操作
83          print_line(__LINE__);
84      cout << "计算 1.0*x ." << endl;
85      Plaintext plain_one;
86      encoder.encode(1.0, scale, plain_one);
87      // 执行乘法和 rescaling 操作:
88      evaluator.multiply_plain_inplace(xc, plain_one);
89      evaluator.rescale_to_next_inplace(xc);
90      // 再次查看 xc 的层级, 可以发现 xc 与 x^2 层级变得相同
91      print_line(__LINE__);
92      cout << " + Modulus chain index for xc new: "
93  << context.get_context_data(xc.parms_id())->chain_index() << endl;
94      // 那么, 此时xc与x^2层级相同, 二者可以相乘了
95
96      // 步骤3, 计算x^3, 即1*x*x^2
97      // 先设置新的变量叫x3
98          print_line(__LINE__);
99      cout << "计算 1.0*x*x^2 ." << endl;
100     Ciphertext x3;
101     evaluator.multiply_inplace(x2, xc);
102     evaluator.relinearize_inplace(x2,relin_keys);
103     evaluator.rescale_to_next(x2, x3);
104     // 此时观察x^3的层级
105     print_line(__LINE__);
106 cout << " + Modulus chain index for x3: "
107 << context.get_context_data(x3.parms_id())->chain_index() << endl;
108
109
110     // 步骤4, 计算y*z
111     print_line(__LINE__);
112     cout << "计算 y*z ." << endl;
113     Ciphertext yz;
114     evaluator.multiply(yc, zc, yz);
115     // 进行 relinearize 和 rescaling 操作
116     evaluator.relinearize_inplace(yz, relin_keys);
117     evaluator.rescale_to_next_inplace(yz);
118     // 然后查看一下此时y*z结果的level
119     print_line(__LINE__);
120     cout << " + Modulus chain index for yz: "
121 << context.get_context_data(yz.parms_id())->chain_index() << endl;
122
123     // 注意, 此时问题在于scales的不统一, 可以直接重制。
```

```
124     print_line(__LINE__);
125     cout << "Normalize scales to 2^40." << endl;
126     x3.scale() = pow(2.0, 40);
127     yz.scale() = pow(2.0, 40);
128     // 输出观察, 此时的scale的大小已经统一了!
129     print_line(__LINE__);
130     cout << " + Exact scale in 1*x^3: " << x3.scale() << endl;
131     print_line(__LINE__);
132     cout << " + Exact scale in  y*z: " << yz.scale() << endl;
133 
134     // 但是, 此时还有一个问题, 就是我们的x^3和yz的层级还不统一!
135     // 在官方 examples 中, 给出了一个简便的变换层级的方法, 如下所示:
136     parms_id_type last_parms_id = x3.parms_id();
137     evaluator.mod_switch_to_inplace(yz, last_parms_id);
138     print_line(__LINE__);
139     cout << " + Modulus chain index for yz new: "
140 << context.get_context_data(yz.parms_id())->chain_index() << endl;
141 
142     // 步骤5, x^3+y*z
143         print_line(__LINE__);
144     cout << "计算 x^3+y*z ." << endl;
145     Ciphertext encrypted_result;
146     evaluator.add(x3, yz, encrypted_result);
147 
148     // 计算完毕, 服务器把结果发回客户端
149     Plaintext result_p;
150     decryptor.decrypt(encrypted_result, result_p);
151 
152     // 注意要解码到一个向量上
153     vector<double> result;
154     encoder.decode(result_p, result);
155 
156     // 输出结果
157         print_line(__LINE__);
158     cout << "结果是: " << endl;
159     print_vector(result, 3 /*precision*/);
160 
161     return 0;
162 }
```

(三) 实验结果展示

编写 CMakeLists.txt，内容如下所示:

```
cmake_minimum_required(VERSION 3.10)
project(demo)
add_executable(he homework.cpp)
add_compile_options(-std=c++17)
find_package(SEAL)
target_link_libraries(he SEAL::seal)
```

这段 CMakeListx.txt 的内容是：CMake 最低版本要求是 3.10，项目名称是 demo，源文件是 homework.cpp。编译选项是使用 C++17 标准。同时，使用 find_package 命令查找 SEAL 库，并将其链接到可执行文件 he 中。

然后，运行如下命令，如下所示:

```
cmake .
make
./he
```

最终输出的结果如下所示:

```
myc@DESKTOP-2N69J26:~/demo$ ./he
原始向量x是:

    [ 1.000, 2.000, 3.000 ]

原始向量y是:

    [ 2.000, 3.000, 4.000 ]

原始向量z是:

    [ 3.000, 4.000, 5.000 ]


Line  65 --> 计算 x^2 .
Line  73 -->  + Modulus chain index for x2: 1
Line  79 -->  + Modulus chain index for xc: 2
Line  83 --> 计算 1.0*x .
Line  91 -->  + Modulus chain index for xc new: 1
Line  98 --> 计算 1.0*x*x^2 .
Line 105 -->  + Modulus chain index for x3: 0
Line 111 --> 计算 y*z .
Line 119 -->  + Modulus chain index for yz: 1
Line 124 --> Normalize scales to 2^40.
Line 129 -->  + Exact scale in 1*x^3: 1.09951e+12
Line 131 -->  + Exact scale in  y*z: 1.09951e+12
Line 138 -->  + Modulus chain index for yz new: 0
Line 143 --> 计算 x^3+y*z .
Line 157 --> 结果是:

    [ 7.000, 20.000, 47.000, ..., -0.000, -0.000, -0.000 ]

myc@DESKTOP-2N69J26:~/demo$
```

可以看到，我们的结果其中 $7 = 1^3 + 1 * 3$, $20 = 2^3 + 3 * 4$, $47 = 3^3 + 4 * 5$，完全满足 $result = x^3 + y * z$，因此可以证明，本次实验取得圆满成功！

四、 心得体会

本次实验，我学习了 SEAL 库的使用。并且在掌握课上知识的基础上，通过自己手动编写 SEAL 的程序，实现了 $x^3 + y * z$ 的运算。这其中的过程还是比较艰辛的，**困难主要有两方面，一方面是如何妥善地设计乘法的顺序，因为数据的 level 只能降低无法升高，所以要小心设计计算的先后顺序，我的设计是先进行 $1.0 * x$，然后进行 $(1.0 * x) * x^2$，这样得到了 x^3，同时也解决了 level 的问题，最后再加 $y * z$ 得到最终结果；另一方面则是在加法的过程中，我们的 scale 实际上已经变了，因此如果直接相加，会提示 mismatch ，即无法直接相加，解决这个问题我花费了一定的时间，最终在 SEAL 库所给出的官方 example 中，找到了可行的解决办法，即由于我们的 P_1 和 P_2 非常接近，可以直接设置他们的 scale (原文为：set the scales to be the same)，然后才能直接相加，这样我们才能得到最终的结果**。

在仔细研究了 SEAL 库之中所给的 example 的代码和注释，我对 SEAL 库有了更深刻的理解，同时对课上理论的理解也更加透彻了，**尤其是在参数选择那里的解释使我醍醐灌顶！**

本次实验我在编写工程和参考 SEAL 库的官方样例的时候，也进一步熟悉了 CMAKE 这个强大的工具。借此机会，我感觉我在信息安全数学基础、密码学课上学到的理论知识有了进一步的加深，而且我在操作系统、编译原理课程上所学到的对 Linux 和编译的操作有了更加深刻的理解。本次实验不光锻炼了我的代码能力，也使我之前所学知识有了整体的贯通和融合！