

Cifrado Homomorfo

Cuando un tercero tiene que operar con nuestros datos y no queremos que los vea, se aplica cifrado homomorfo, que permite realizar operaciones sobre datos cifrados.

A la hora de operar con cifrado homomorfo se usan los siguientes componentes:

- **n** → Tamaño de los vectores
- **q** → Valor del módulo (módulo q)
 - Trabajamos con módulos en potencias de 2 (2^x)
- **e** → Error
 - Distribución normal $N(0, \gamma^2 q) \rightarrow r = \gamma^2 q$
 - Media 0
 - Valor relacionado con q
 - El valor debe estar redondeado
 - Valor entre 0 y q
- **a** → Vector de soporte
 - Vector de tamaño n con valores entre 0 y q-1
- **S** → Secreto o clave privada
 - Solo la conoce el dueño de los datos a operar
 - Valores aleatorios del conjunto $\{-1, 0, 1\}$

Sabiendo esto, sabemos que la clave pública (a,b) del cifrado homomorfo es:

$$(a, b = S^T a + e \pmod{q}) \in \mathbb{Z}_q^n \times \mathbb{Z}_q$$

Esta fórmula es solo la clave pública, si queremos proceder a realizar el cifrado utilizando esta, debemos introducir otros 2 elementos:

- **m** → Mensaje a Cifrar
- **Δ** → Constante (Normalmente su valor es una potencia de 2)

El cifrado homomórfico se vería de la siguiente forma:

$$(a, b = S^T a + e + \Delta m \pmod{q})$$

- Clave pública → $(S^T a + e)$
- Texto Cifrado → $b = S^T a + e + \Delta m \pmod{q}$
- **OJO**: a y b son necesarios para poder descifrar el mensaje

Cuando se mandan datos a un tercero para operar con ellos, se mandan a y b

$$\Delta m + e = b + S^T a$$

- $m' = \Delta * m + e \rightarrow$ Mensaje aproximado con error

$$m + e = (b + S^T * a) / \Delta \pmod{q}$$

- $m' = m + e$

$$m = \lfloor (b + S^T * a) / \Delta - e \rfloor \pmod{q}$$

- Redondeamos el resultado para el descifrado
- Si todo va bien, al realizar el redondeo desaparece el error aplicado y el valor final obtenido es el mensaje inicial.

Ejemplo de Cifrado Homomórfico

DATOS

$n = 2$
 $q = 4 = 2^2$
 $\Delta = 1 = 2^0$
 $e = 0$ (no hay error)
 $S = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
 $a = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$
 $m = 1$

Cifrado

$$(a = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, b = S^T * a + e + \Delta * m) \pmod{q}$$

$$b = (1 \ 0) * \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} + 0 + 1 * 1$$

$$b = 2 + 0 + 0 + 1 * 1 = 3$$

$$b = 3$$

Descifrado

$$(a = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, b = 3)$$

$$m' = \frac{b - S^T * a - e}{\Delta} \pmod{q}$$

$$m' = \frac{3 - (1 \ 0) * \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} - 0}{1} \pmod{4}$$

$$m' = \frac{3 - 2}{1} \pmod{4}$$

$$m = 1$$

Sumas sobre cifrado Homomórfico

Ejemplo de suma con cifrado homomórfico

Datos

$n = 2$
 $q = 4 = 2^2$
 $\Delta = 1 = 2^0$
 $e = 0$
 $S = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
 $m_1 = 1$
 $m_2 = 2$
 $a_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$
 $a_2 = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$

$$(a_1, b_1 = S^T * a_1 + e_1 + \Delta * m_1 \pmod{q})$$

$$(a_2, b_2 = S^T * a_2 + e_2 + \Delta * m_2 \pmod{q})$$

$$m_1 = \frac{b_1 - S^T * a_1 - e_1}{\Delta}$$

$$m_2 = \frac{b_2 - S^T * a_2 - e_2}{\Delta}$$

$$m_1 + m_2 = \frac{b_1 - S^T * a_1 - e_1}{\Delta} + \frac{b_2 - S^T * a_2 - e_2}{\Delta} =$$

$$= \frac{b_1 + b_2 - S^T * (a_1 + a_2) - e_1 - e_2}{\Delta} \pmod{q}$$

$$(a_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}, b_1 = 3)$$

$$(a_2 = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}, b_2 = 1)$$

$$m_1 + m_2 = (a_+ = a_1 + a_2, b_+ = b_1 + b_2) \pmod{q} =$$

$$= (a_+ = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}, b_+ = 3 + 1) \pmod{4} =$$

$$= (a_+ = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, b_+ = 0)$$

$$\hat{m}_+ = \frac{b_+ - S^T * a_+ - e_+}{\Delta} \pmod{q} = \frac{0 - (1 \ 0) * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - e_+}{1} \pmod{4} = -1/1 \pmod{4} = 3$$

$$m_1 + m_2 = \hat{m}_+ = 3$$

Multiplicación de cifrado homomórfico contra una pequeña constante

Multiplicación por una constante pequeña con homomórfico

$$b = S^T * a + e + \Delta * m \mod q$$
$$\hat{m} = \frac{b - S^T * a - e}{\Delta} \mod q$$

$$c * \hat{m} = c * \left(\frac{b - S^T * a - e}{\Delta} \right) \mod q =$$

$$= \frac{\overbrace{c * b}^{b*} - \overbrace{c * S^T * a}^{a*} - \overbrace{c * e}^{e*}}{\Delta} \mod q$$
$$(a* = a * c, b* = b * c) \mod q$$

NOTA: Si el valor de C es muy grande puede descuadrarse todo al multiplicarse el error.

Descomposición gadget

La descomposición gadget consiste en tomar un número grande y descomponerlo en bloques. Esto se usa en las multiplicaciones con cifrado homomórfico para evitar que se descuadren los valores.

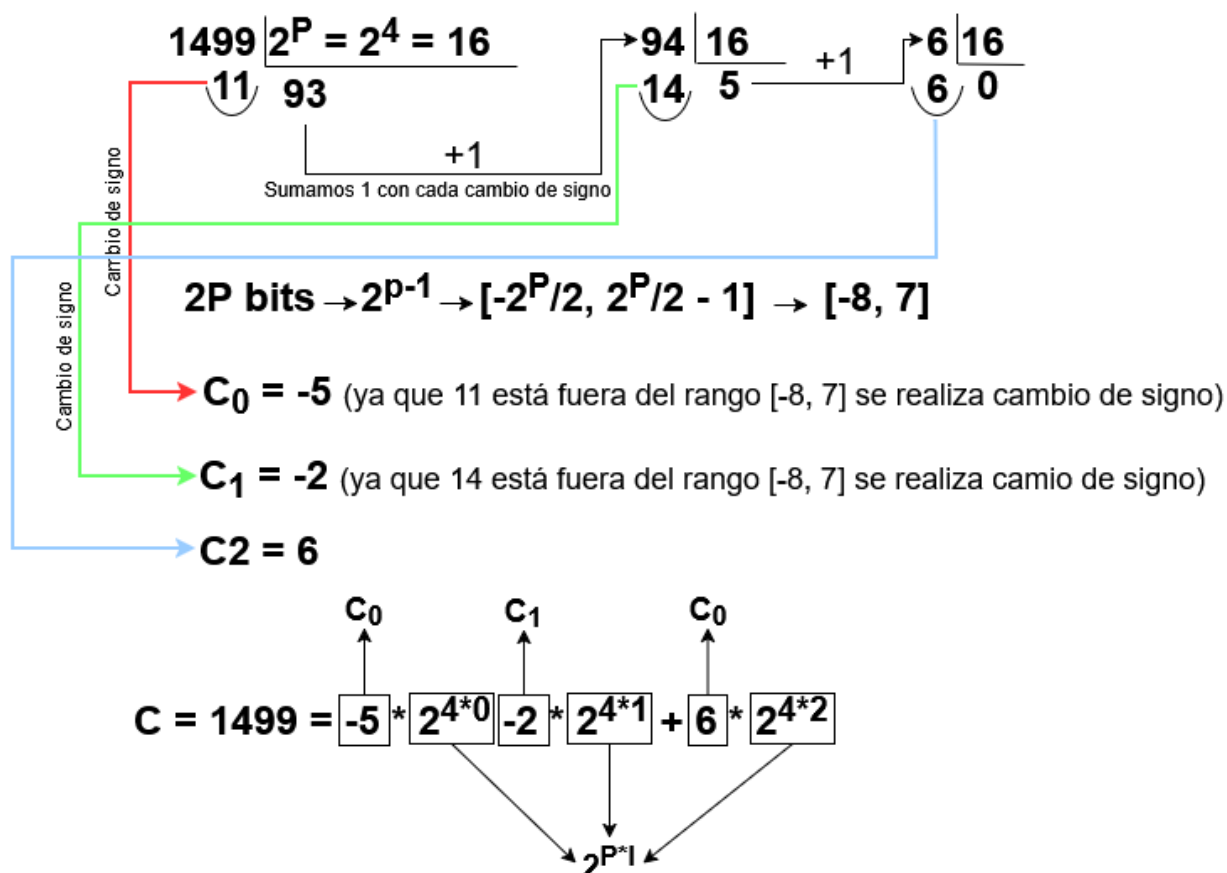


La descomposición gadget permite calcular varios factores de la constante C. Se tienen en cuenta los siguientes datos:

- C: Constante a descomponer
- B: En cuantos trozos se va a descomponer
- P: Valor de la potencia de 2 que se va a utilizar para realizar las divisiones.

Ejemplo de Descomposición Gadget:

Para $C = 1499$, $B = 3$ y $P = 4$



Descomposición Gadget en el Cifrado Homomórfico

Gracias a la descomposición gadget podemos descomponer una multiplicación homomórfica por una constante muy grande de la siguiente forma para $(a*c, b*c)$:

- $(a*c_0, b*c_0)$
- $(a*c_1, b*c_1)$
- $(a*c_2, b*c_2)$

Lo que reduce el error de forma considerable

$$C = C_2 \cdot 2^{\{P \cdot 2\}} + C_1 \cdot 2^{\{P \cdot 1\}} + C_0 \cdot 2^{\{P \cdot 0\}}$$

Para ello, se crean varios mensajes cifrados:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= m * 2^{P*2} \\ m_2 &= m * 2^{P*1} \\ m_3 &= m * 2^{P*0} \end{aligned} \right\}$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{aligned} (a*c^0, b_{m1} * c_0) \\ (a*c^1, b_{m2} * c_1) \\ (a*c^2, b_{m3} * c_2) \end{aligned} \right.$$

Ejemplo de aplicación de descomposición Gadget a Multiplicaciones con Cifrado Homomórfico

DATOS

$S = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
 $n = 2$
 $m = 2$
 $q = 2^4 = 16$
 $c = 7$
 $\Delta = 2^0 = 1$
 $P = 2$
 $e = 0$
 $P = 4$

1. Aplicamos Descomposición Gadget a C

$2P \text{ bits} \rightarrow 2^{P-1} \rightarrow [-2^{P/2}, 2^{P/2} - 1] \rightarrow [-8, 7]$

7 | 4

3 | 1 | 4

| 1 | 0

$\sim 2 \text{ Restos} \rightarrow B = 2$

$C = 1 * 2^{2*1} + 3 * 2^{2*0}$

2. Realizamos 2 cifrados

Descomponemos en 2 bloques y realizamos el cifrado

$\begin{aligned} *3 &\rightarrow 2^{2*0} \rightarrow (a = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}, b = 2 + 0 + 0 + 1 + 2 * 2^{2*0} = 4) \rightarrow m_1 = 4 \\ *1 &\rightarrow 2^{2*1} \rightarrow (a = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}, b = 3 + 0 + 0 + 1 + 2 * 2^{2*1} = 11) \rightarrow m_2 = 11 \end{aligned}$

$m_2 = -5$

Fuera de rango [-8,7]
Cambiamos Signo

3. Multiplicamos los cifrados resultantes y los sumamos

$3 * (a = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}, b = 12) \Rightarrow (a = \begin{pmatrix} 6 \\ 9 \end{pmatrix}, b = 12) \Rightarrow (a = \begin{pmatrix} 6 \\ 7 \end{pmatrix}, b = -4)$

$1 * (a = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}, b = -5) \Rightarrow (a = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}, b = -5)$

Sumamos

$(a_+ = \begin{pmatrix} 9 \\ 10 \end{pmatrix}, b_+ = 7)$

Así se obtiene el resultado de la multiplicación cifrado reduciendo considerablemente el error

From:
<https://www.knoppia.net/> - Knoppia

Permanent link:
https://www.knoppia.net/doku.php?id=pan:cifrado_homomorfico_v2&rev=1767197370

Last update: 2025/12/31 16:09

Knoppia - <https://www.knoppia.net/>