一种多阶段密钥交换协议的设计与实现

答辩人：史豪

指导老师：王立斌

华南师范大学

2025 年 4 月 28 日

目录

研究目标

- 量子计算威胁传统密码体系
- 多阶段密钥交换 (MSKE) 协议在现代网络通信的广泛应用
- TIMKE 协议提供紧致安全和后量子安全，有望解决大规模部署的安全问题

TIMKE 协议图

客户端 C		**服务器 S**
服务器预共享的长期公钥 pk_S		服务器的长期私钥 sk_S
$(\mathsf{epk}_C, \mathsf{esk}_C) \leftarrow \mathsf{Gen}_2(\mathsf{par})$		
$(C_1, K_1) \leftarrow \mathsf{Encap}_1(pk_S)$		
$\mathsf{K}_{\mathsf{tmp}} := \mathsf{H}_1(pk_S, C_1, K_1)$	$\mathsf{epk}_C, C_1 \longrightarrow$	$K_1 := \mathsf{Decap}_1(sk_S, C_1)$
$C_{payload} \leftarrow \mathrm{Enc}(\mathrm{K}_{\mathrm{tmp}}; M_{\text{0-RTT}})$	$C_{payload}$	$\mathsf{K}_{\mathsf{tmp}} := \mathsf{H}_1(pk_S, C_1, K_1)$
		$M_{\text{0-RTT}} := \mathsf{Dec}(\mathsf{K}_{\mathsf{tmp}}, C_{payload})$
Stage-1 end		
		$(C_2, K_2) \leftarrow \mathsf{Encap}_2(\mathsf{epk}_C)$
$K_2 := \mathsf{Decap}_2(\mathsf{esk}_C, C_2)$	$C_2 \longleftarrow$	$\mathsf{K}_{\mathsf{main}} := \mathsf{H}_2(pk_S, \mathsf{epk}_C, C_1, C_2, K_1, K_2)$
$\mathsf{K}_{\mathsf{main}} := \mathsf{H}_2(pk_S, \mathsf{epk}_C, C_1, C_2, K_1, K_2)$	$C'_{payload}$	$C'_{payload} \leftarrow \mathrm{Enc}(\mathrm{K}_{\mathrm{main}}; M_1)$
$M_1 := \mathsf{Dec}(\mathsf{K}_{\mathsf{main}}, C'_{payload})$		
Stage-2 end		

主要工作内容

- 实现一种基于格的 OW-ChCCA KEM
- 系统化实现紧致安全多阶段密钥交换协议 (TIMKE)
- 提供完整的演示系统与性能测试框架

开发语言——Golang

- 提供完善的密码学支持
- 静态类型系统和内存安全
- 跨平台兼容性优秀
- 编译速度快
- 拥有强大的并发处理能力

OW-ChCCA KEM 实现

- 基于格的 OW-ChCCA KEM 的数据结构设计、算法实现
- 性能优化（并行矩阵运算、优化内存管理等）

基于格的 OW-ChCCA KEM

Alg $\mathsf{Setup}(1^\lambda)$

01 **return** $\mathsf{par} := \mathbf{A} \xleftarrow{\$} \mathbb{Z}_q^{n\times m}$

Alg $\mathsf{Gen}(\mathsf{par})$

02 $b \xleftarrow{\$} \{0,1\},\ \mathbf{Z}_b \leftarrow D_{\mathbb{Z},\alpha}^{m\times\lambda}$

03 $\mathbf{U}_b := \mathbf{A}\mathbf{Z}_b,\ \mathbf{U}_{1-b} \xleftarrow{\$} \mathbb{Z}_q^{n\times\lambda}$

04 $\mathsf{pk} := (\mathbf{U}_0, \mathbf{U}_1),\ \mathsf{sk} := (\mathbf{Z}_b, b)$

05 **return** $(\mathsf{pk}, \mathsf{sk})$

Alg $\mathsf{Encap}(\mathsf{pk})$

06 $R \xleftarrow{\$} \{0,1\}^\lambda,\ (\mathbf{s}, \rho, \mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1) := \mathsf{G}(R)$

07 $\mathbf{e} := \mathsf{SampleD}(m, \alpha'; \rho)$

08 $\mathbf{x} := \mathbf{A}^t\mathbf{s} + \mathbf{e}$

09 $\hat{\mathbf{h}}_0 := \mathbf{U}_0^t\mathbf{s} + \mathbf{h}_0\lfloor q/2\rceil \in \mathbb{Z}_q^\lambda$

10 $\hat{\mathbf{h}}_1 := \mathbf{U}_1^t\mathbf{s} + \mathbf{h}_1\lfloor q/2\rceil \in \mathbb{Z}_q^\lambda$

11 $\hat{K}_0 := \mathsf{H}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{h}}_0, \mathbf{h}_0),\quad C_0 := \hat{K}_0 \oplus R$

12 $\hat{K}_1 := \mathsf{H}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{h}}_1, \mathbf{h}_1),\quad C_1 := \hat{K}_1 \oplus R$

13 $\mathsf{ct} := (C_0, C_1, \mathbf{x}, \hat{\mathbf{h}}_0, \hat{\mathbf{h}}_1)$

14 **return** $(\mathsf{ct}, K := R)$

Alg $\mathsf{Decap}(\mathsf{sk}, \mathsf{ct})$

15 **let** $\mathsf{ct} = (C_0, C_1, \mathbf{x}, \hat{\mathbf{h}}_0, \hat{\mathbf{h}}_1)$

16 **let** $\mathsf{sk} = (\mathbf{Z}_b, b)$

17 $\mathbf{h}'_b := \mathsf{Round}(\hat{\mathbf{h}}_b - \mathbf{Z}_b^t\mathbf{x}) \in \{0,1\}^\lambda$

18 $\hat{K}_b := \mathsf{H}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{h}}_b, \mathbf{h}'_b)$

19 $R := C_b \oplus \hat{K}_b$

20 $(\mathbf{s}, \rho, \mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1) := \mathsf{G}(R)$

21 $\mathbf{e} := \mathsf{SampleD}(m, \alpha'; \rho)$

22 $\hat{\mathbf{h}}'_{1-b} := \mathbf{U}_{1-b}^t\mathbf{s} + \mathbf{h}_{1-b}\lfloor q/2\rceil$

23 $\hat{K}_{1-b} := \mathsf{H}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{h}}'_{1-b}, \mathbf{h}_{1-b})$

24 **if** $\mathbf{x} \neq \mathbf{A}^t\mathbf{s} + \mathbf{e}$: **return** $\perp$

25 **if** $\hat{K}_{1-b} \oplus R \neq C_{1-b}$: **return** $\perp$

26 **if** $\mathbf{h}'_b \neq \mathbf{h}_b$: **return** $\perp$

27 **if** $\hat{\mathbf{h}}'_{1-b} \neq \hat{\mathbf{h}}_{1-b}$: **return** $\perp$

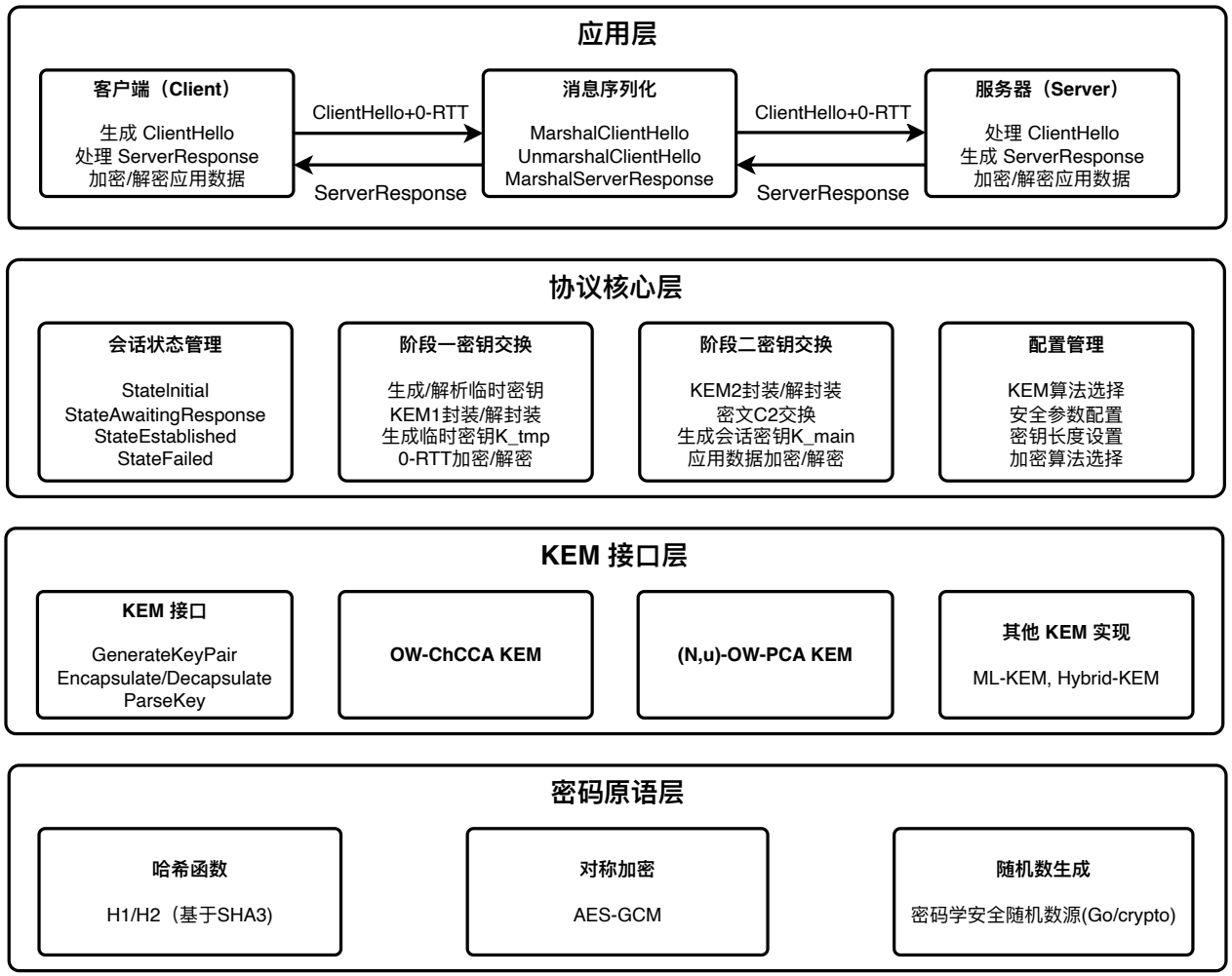
28 **return** $K := R$

Figure 4: The key encapsulation mechanism $\mathsf{KEM}_{\mathsf{LWE}} = (\mathsf{Setup}, \mathsf{Gen}, \mathsf{Encap}, \mathsf{Decap})$, where $\mathsf{H}\colon \{0,1\}^* \to \{0,1\}^\lambda$ and $\mathsf{G}\colon \{0,1\}^* \to [-\eta,\eta]^n \times \{0,1\}^\lambda \times \{0,1\}^\lambda \times \{0,1\}^\lambda$ are random oracles. To save space, one could set $\mathbf{A} := \mathsf{H}^*(0)$ for a random oracle $\mathsf{H}^*\colon \{0,1\}^* \to \mathbb{Z}_q^{n\times m}$.

TIMKE 协议实现

- 协议架构：应用层、序列化层、协议核心层、KEM 接口层、密码原语层
- 协议流程：预共享、第一阶段 (0-RTT)、第二阶段 (弱前向安全)

TIMKE 协议实现 - 架构图 P.22



TIMKE 协议实现 - 演示系统

图: TIMKE 协议演示系统界面

TIMKE 协议实现 - 演示系统

图: TIMKE 服务端长期密钥生成

TIMKE 协议实现 - 演示系统

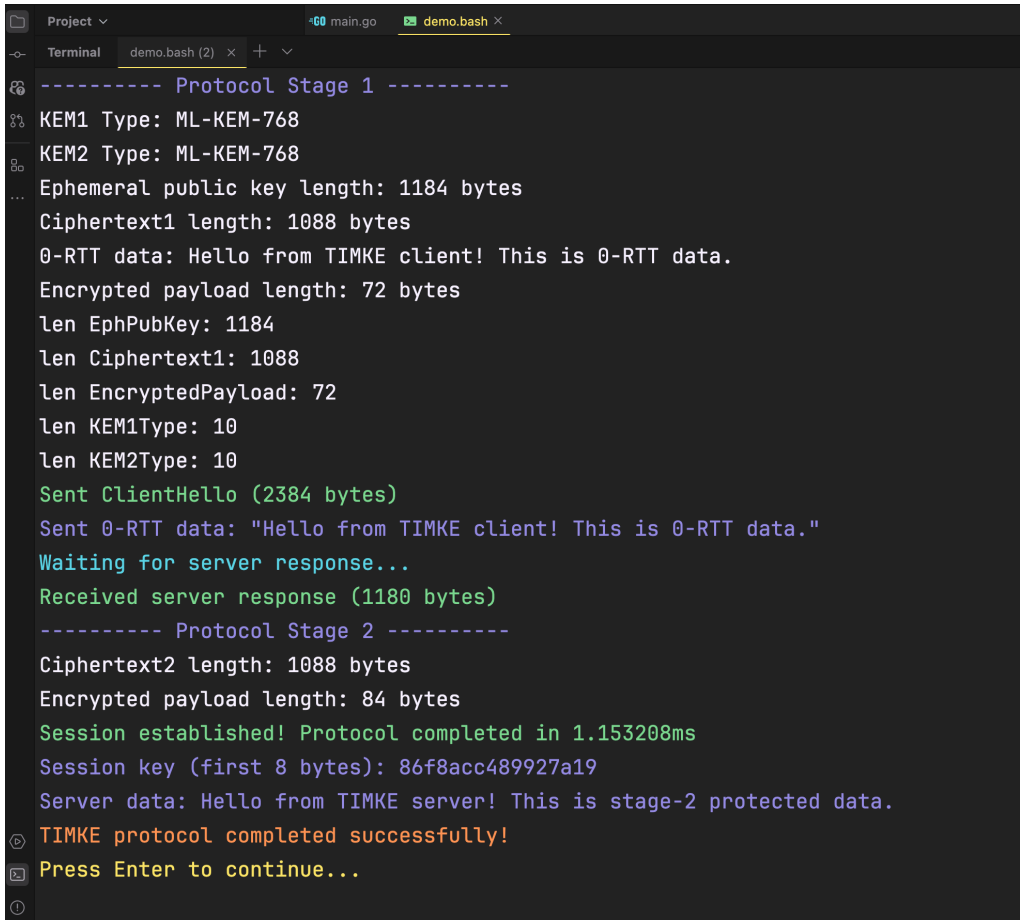


图: TIMKE 协议演示系统界面

性能评估与分析

- 评估 OW-ChCCA KEM 理论参数的实用性挑战
- OW-ChCCA KEM 与 ML-KEM 性能对比 (计算时间、内存占用、密钥大小)
- 不同 KEM 组合的 TIMKE 协议性能评估

KEM 组合	阶段 1	阶段 2	总时间	内存 (KB)
OWChCCA-mini + ML-KEM-512	322.18	118.53	440.71	2,206,372
OWChCCA-mini + ML-KEM-768	324.47	117.61	442.07	2,206,250
OWChCCA-mini + ML-KEM-1024	374.76	127.47	502.23	2,204,554

表: 混合 KEM 实现的 TIMKE 协议性能（单位：毫秒）

性能评估与分析

- 评估 OW-ChCCA KEM 理论参数的实用性挑战
- OW-ChCCA KEM 与 ML-KEM 性能对比 (计算时间、内存占用、密钥大小)
- 不同 KEM 组合的 TIMKE 协议性能评估
- ML-KEM 替代方案的优异性能：毫秒级执行时间、低内存占用
- 结论：理论构造与实用性能的权衡

结论与展望

- 主要成果:
  - 实现基于格的 OW-ChCCA KEM
  - 成功实现紧致安全后量子协议并验证其可行性
- 未来工作方向:
  - 结构化格上的 OW-ChCCA KEM 优化
  - 协议功能扩展
  - 实际应用集成

额外工作

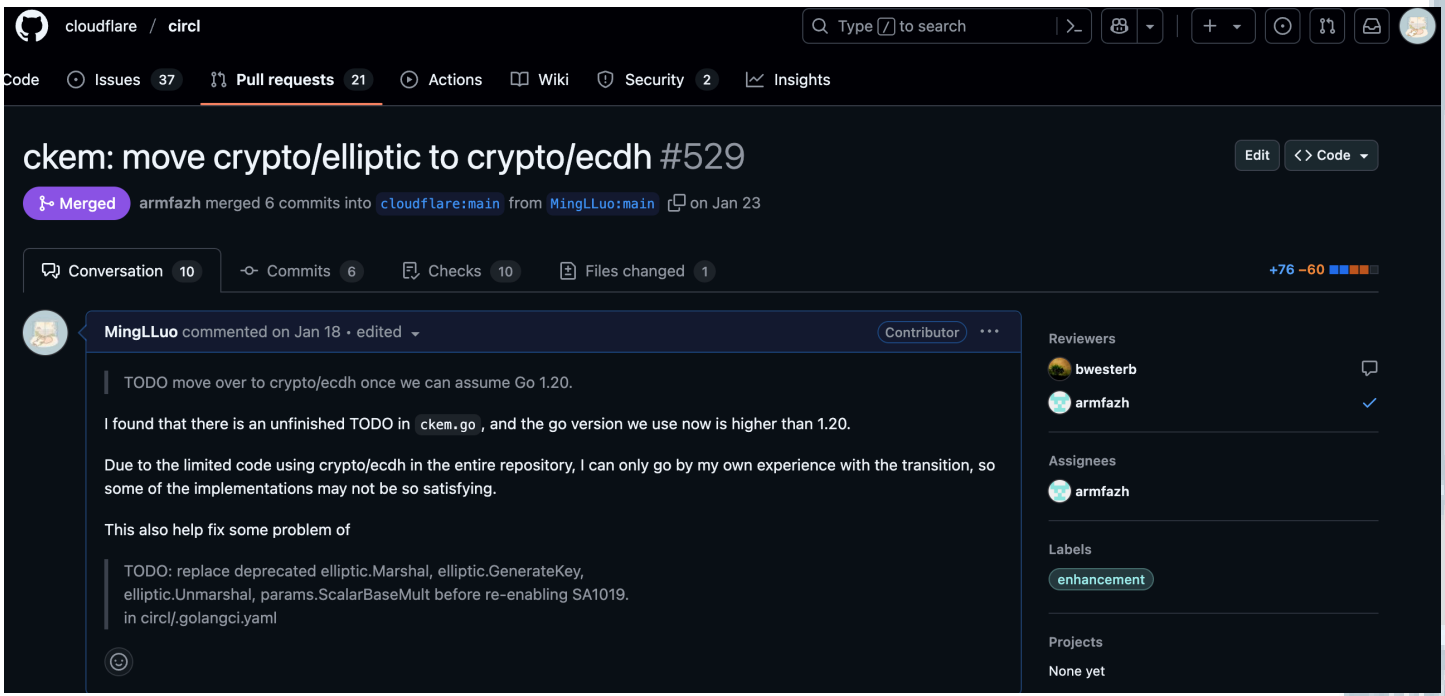


图: Cloudflare CIRCL 库的开源贡献

致谢

感谢评审老师们的耐心倾听！