西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

计算机科学与技术学院
School of Computer Science and Technology

第五章 大数据处理及安全隐私

彭延国

ygpeng@xidian.edu.cn

§5 大数据处理及安全隐私 - 将数据部署到云端

- 大数据特性：
  - Volume、Velocity、Variety、Veracity、Value
- 带来的困境
  - 用户端难以存储和处理
- 解决途径
  - 将数据加密后存储在云端

flickr

foursquare™

阿里云邮 qiye.aliyun.com

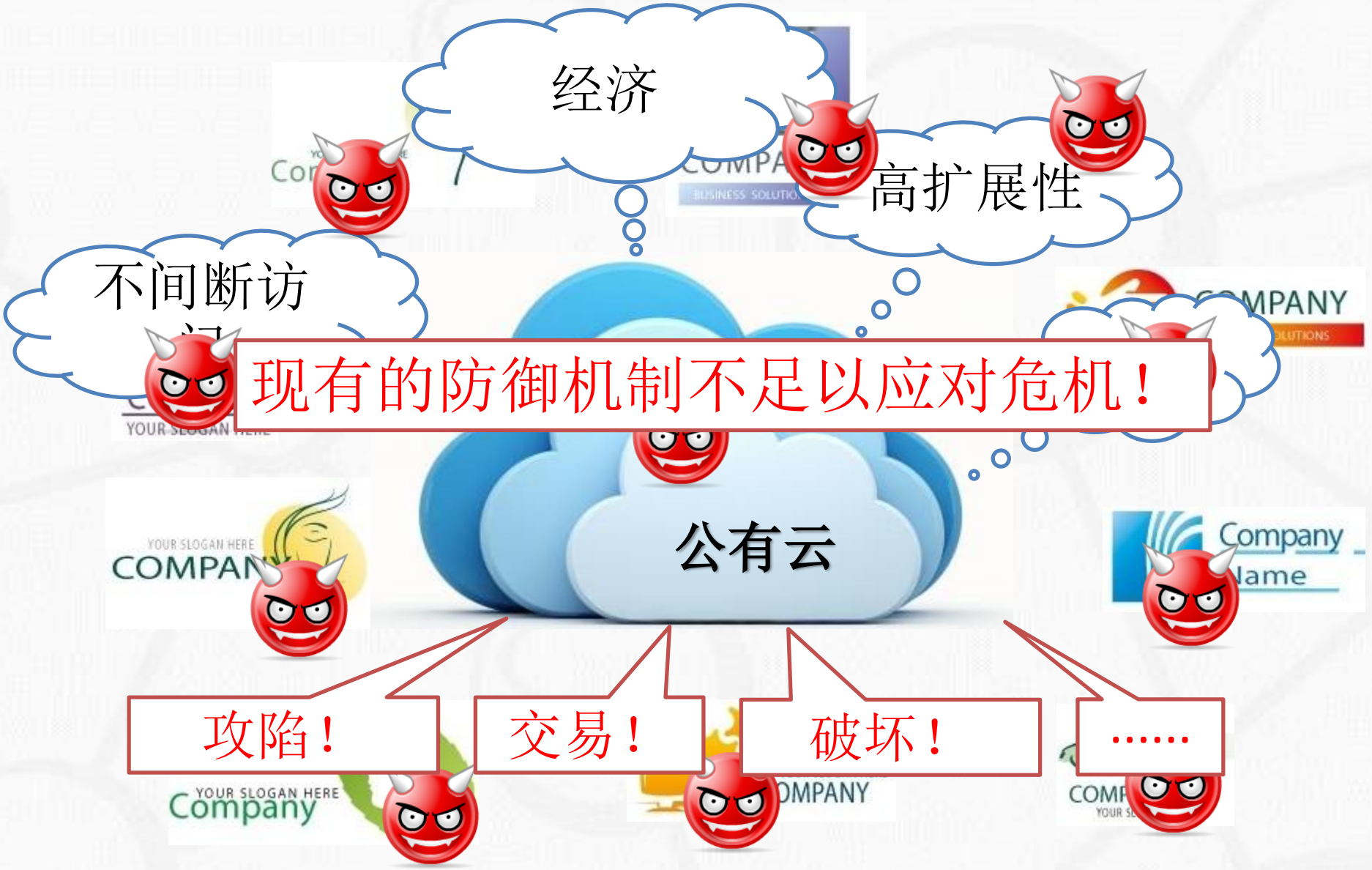
NETFLIX

EasyChair The conference system

Expedia®

https://aws.amazon.com/cn/solutions/case-studies/

§5 大数据处理及安全隐私 - 云端面临的安全威胁



§5 大数据处理及安全隐私 - 搜索

- 检索(Search，Retrieval)[1]：特指信息检索，是从大规模非结构化数据的集合中找出满足用户信息需求资料的过程。
- 操作对象：
  - 通常是文本(文档)、数值、复杂数据(时空数据、高维数据、图像、声音等)
- 存储地点：
  - 本地计算机、存储设备
  - 云端存储设备
- 核心任务：
  - 满足用户信息需求

检索是用户信息需求的基石

[1] C Manning, P Raghavan, H Schutze, et al. 信息检索导论[M]. 人民邮电出版社, 2010.

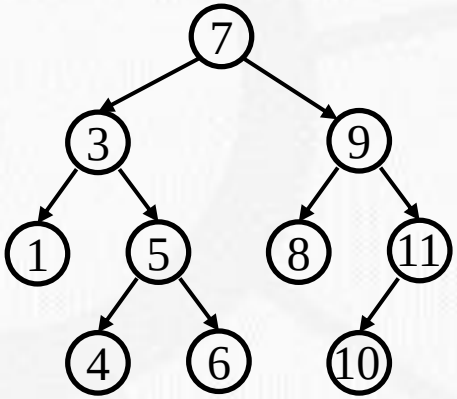
西安電子科技大學
XIDIAN UNIVERSITY

排序、索引

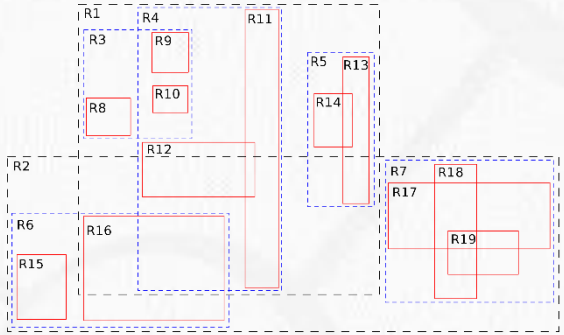
§5.1 保序加密技术

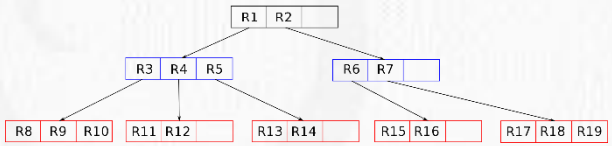
§5.1 保序加密技术 - 索引

- 索引(Index)[1]：是一种数据结构，目的是提高数据检索操作的速度，代价是增加了维护索引数据结构的存储空间。
- 索引的类型：
  - 树形索引(Tree-based Index)
  - 倒排文档
- 树形索引的核心
  - 数据具有偏序关系
- 密文上的偏序关系
  - 保序加密技术

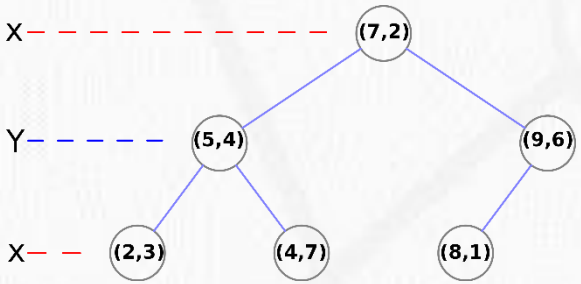


二叉树





R树

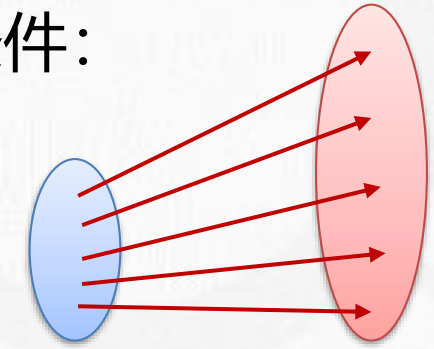


KD树

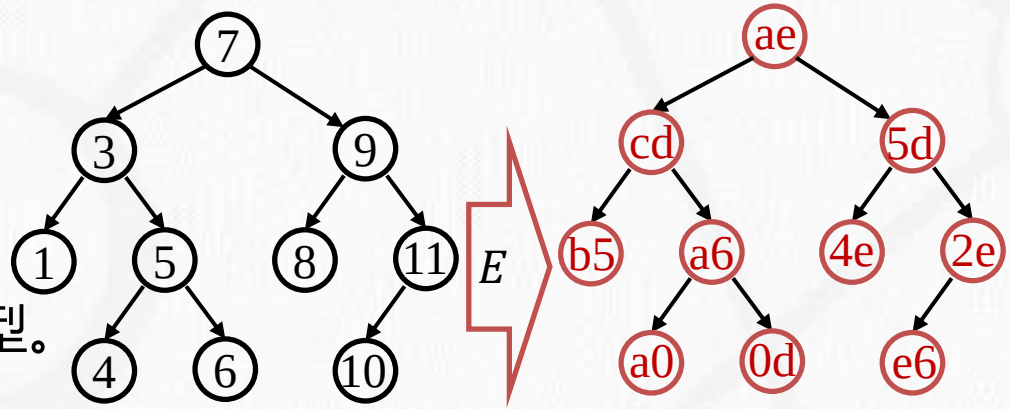
[1] G M Hector, D U Jeffrey, D W Jennifer. Database Systems: The Complete Book[M]. Pearson. 2008.

§5.1 保序加密技术 - 索引

- 保序加密(Order-Preserving Encryption, OPE)：给定一个明文，$m \in M$、加密方案$E_{sk}(m)$: $\{sk, m\} \rightarrow c \in C$和密文$C$， E是一个保序加密方案，当且仅当满足以下条件：
  - 正确性：$D_{sk}\left(E_{sk}(m)\right) = m$。
  - 保序性：$m_0 \leq m_1$当且仅当$c_0 \leq c_1$。



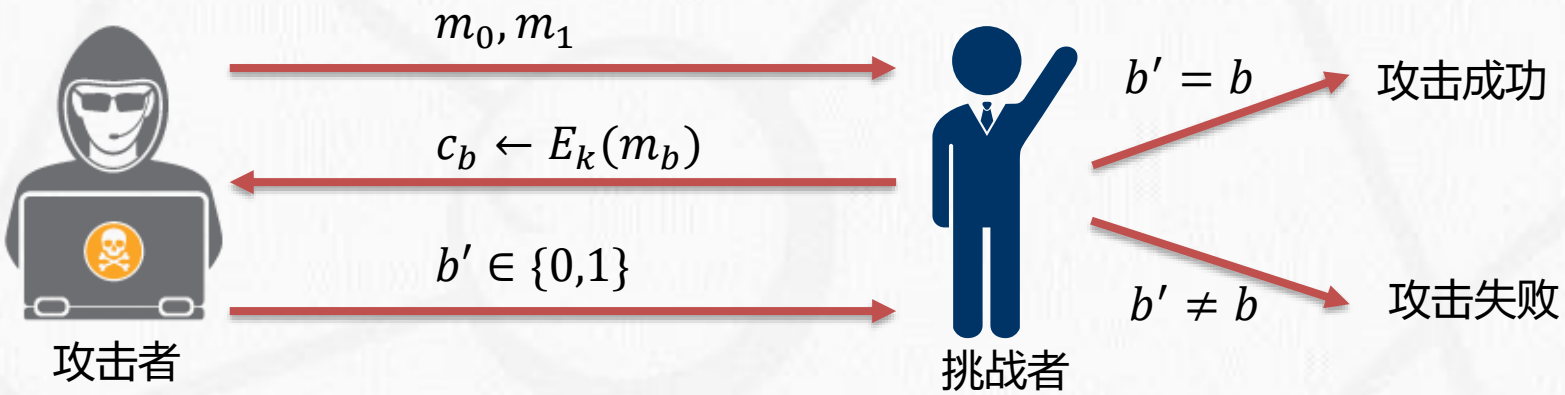
- 安全性需求：
  - IND-CPA不再适用；
  - ROPF、IND-OCPA安全模型。



基于OPE实现安全索引

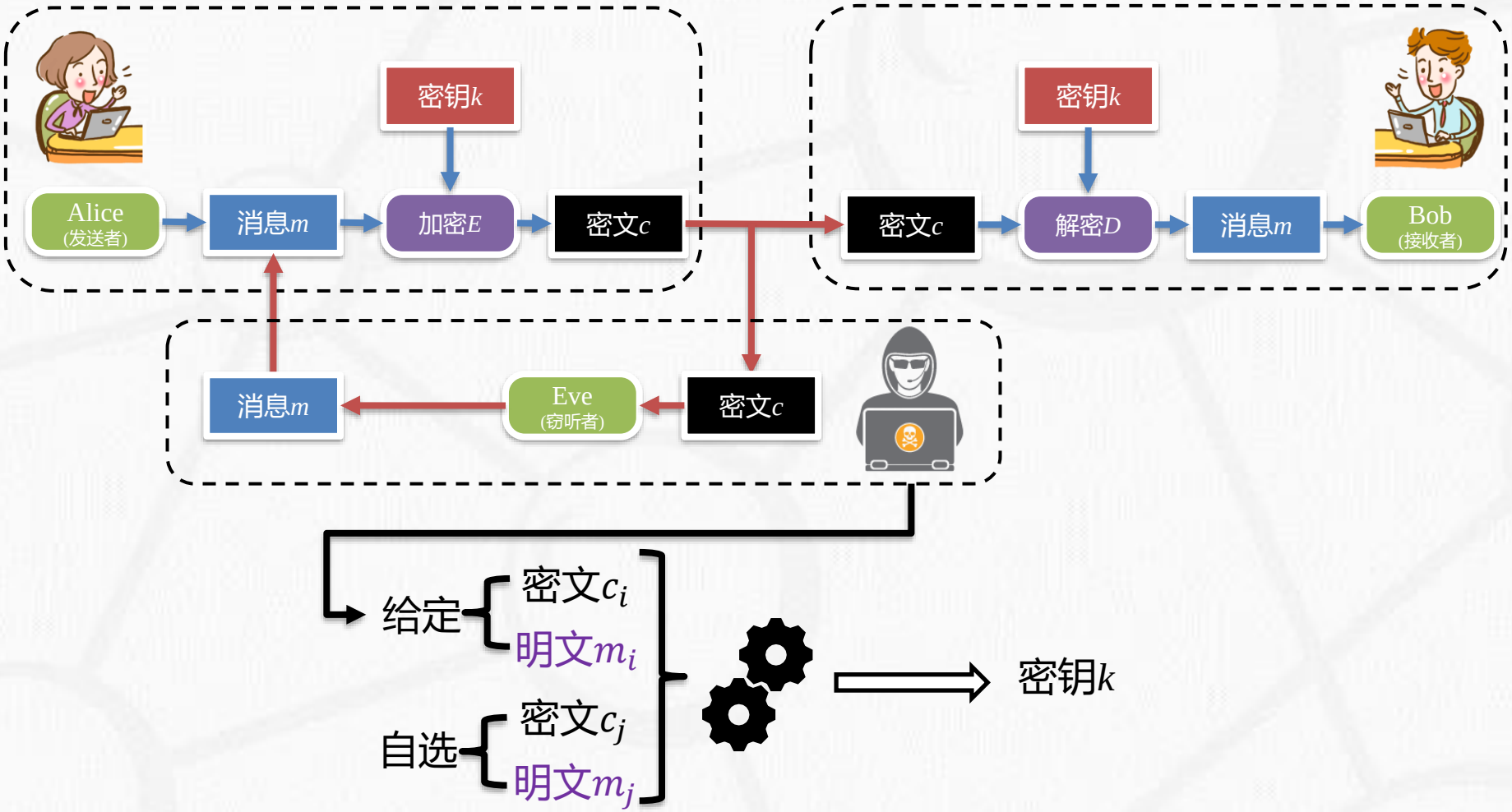
§5.1 保序加密技术 - IND-CPA回顾(1)

- 不可区分性(Indistinguishability)
  - 攻击者(Adversary)对两个明文m_0和m_1进行挑战。挑战者(Challenger)随机选择其中的一个明文用给定的加密方案加密得到密文c_b，并发送给攻击者。攻击者猜测$b' \in \{0,1\}$，若满足下式则称该加密方案是不可区分安全的：
    - $|\Pr[b = b'] - \frac{1}{2}| \leq negl(n)$。



§5.1 保序加密技术 - IND-CPA回顾(2)

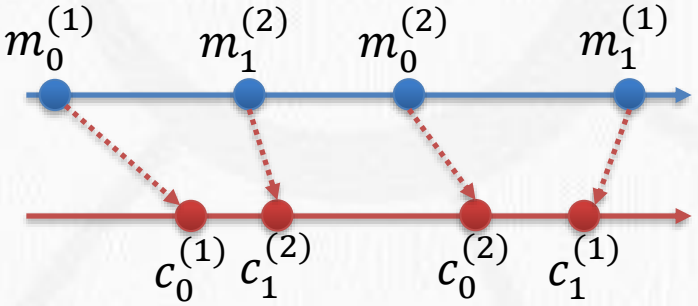
- 选择明文攻击(CPA: Chosen-Plaintext Attack)
  - 攻击者自主选择明文m_i，并获得对应的密文c_i



§5.1.1 保序加密技术 - IND-OCPA的来源

- 为什么IND-CPA不适用于保序加密？
  - IND-CPA的核心思想：
    - 任给两个明文m_0和m_1，攻击者$\mathcal{A}$进行加密挑战，得到c_0和c_1，随机返回一个密文$c_b, b \in \{0,1\}$。$\mathcal{A}$进行猜测$b' \in \{0,1\}$，如果$b' = b$，则攻击成功。

单轮的CPA攻击



基于CPA攻击攻破保序加密

    - 显然的，经过两轮的CPA攻击，可以明显猜测出第一轮的b'。

- 因此，从基本理论上可以推导出：任何保序加密方案均不可能达到IND-CPA安全。

§5.1.1 保序加密技术 - IND-OCPA安全模型

- IND-OCPA安全(Indistinguishability under ordered chosen plaintext attack)：
  - 给定一个协议Π，如果对于所有的概率多项式时间的攻击者 $\mathcal{A}$ 存在可忽略函数 $negl$, 满足

$$\mathrm{Adv}_{\Pi}^{\mathrm{IND-OCPA}}(\mathcal{A}) = \left|\Pr\left[\mathrm{Exp}_{\Pi}^{\mathrm{IND-OCPA}} = b\right] - \frac{1}{2}\right| \leq negl$$

  - 则保序加密方案Π是IND-OCPA安全的。也称为理想安全的。
- 通俗来讲，理想安全性要求密文除去明文顺序信息而不泄露明文的其他任何信息。
- 此外，保序加密的安全模型还有：
  - IND-FAOCPA等

[1] A Boldyreva, N Chenette, A Neill. Order-preserving encryption revisited: Improved security analysisand alternative solutions[C]. CRYPTO. 2011: 578–595.

§5.1.1 保序加密技术 - 实例1(Liu等)

- Liu等[1]提出的保序加密方案
  - 密钥: a, b
  - 加密函数:$E(m) = am + b + n$，其中n为噪声
- 一种潜在的CPA攻击:
  - 例子: $a = 10, b = 3, n \in [1,3]$
  - 选择的明文序列: $m_1 = 0, m_2 = 5, m_3 = 13, m_4 = 21, m_5 = 102$
  - 获得的密文序列: $c_1 = 4, c_2 = 55, c_3 = 136, c_4 = 214, c_5 = 1026$
  - 攻击原理: $c_i - c_1 = am_i + n_i - n_1$

$$\frac{c_i - c_1}{m_i + 1} \leq a \leq \frac{c_i - c_1}{m_i - 1}$$

[1] D Liu, S Wang. Programmable order-preserving secure index for encrypted database query[C]. IEEE Cloud. 2012: 502-509.

§5.1.1 保序加密技术 - 实例1(Liu等) 续

- Liu等[1]提出的保序加密方案
  - 密钥: a, b
  - 加密函数:$E(m) = am + b + n$，其中n为噪声
- 一种潜在的CPA攻击:
  - 攻击原理: $\frac{c_i - c_1}{m_i + 1} \leq a \leq \frac{c_i - c_1}{m_i - 1}$
  - 攻击结果: 推断出$a = 10$
- 进一步可以推断出全部明文信息。
- 无法达到IND-OCPA安全。

序号	m	c	a
1	0	4	-
2	5	55	[9,12]
3	13	136	[10,11]
4	21	214	[10,11]
5	102	1026	[10,10]

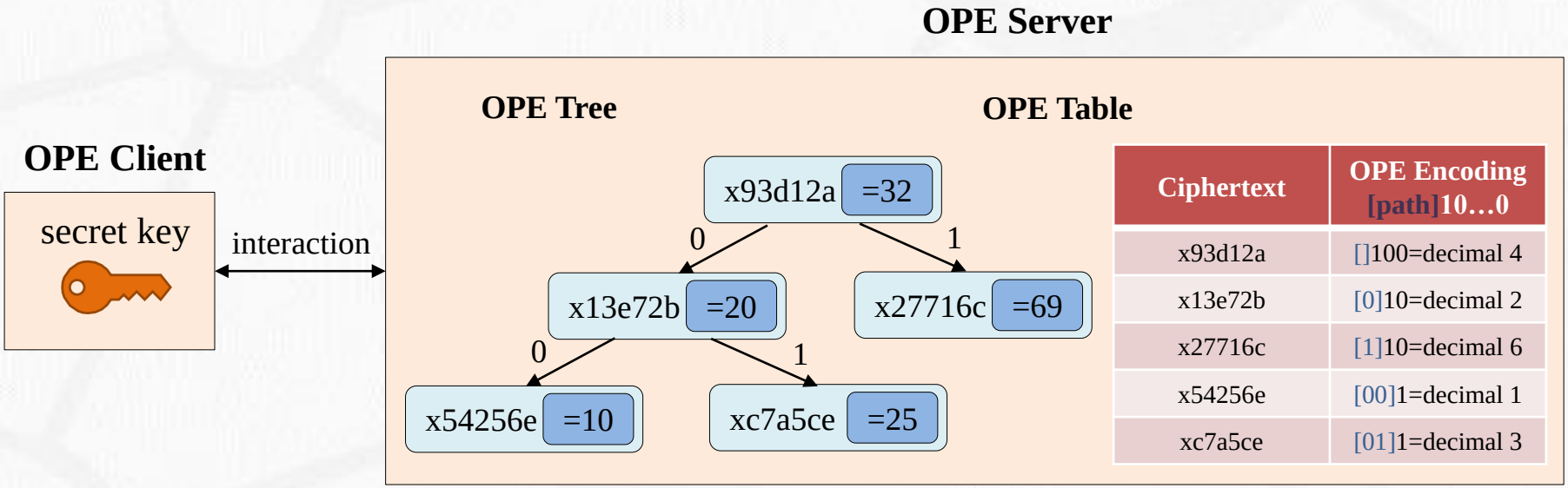
[1] D Liu, S Wang. Programmable order-preserving secure index for encrypted database query[C]. IEEE Cloud. 2012: 502-509.

§5.1.1 保序加密技术 - 实例2(Popa等)

- 理想安全的保序加密技术：

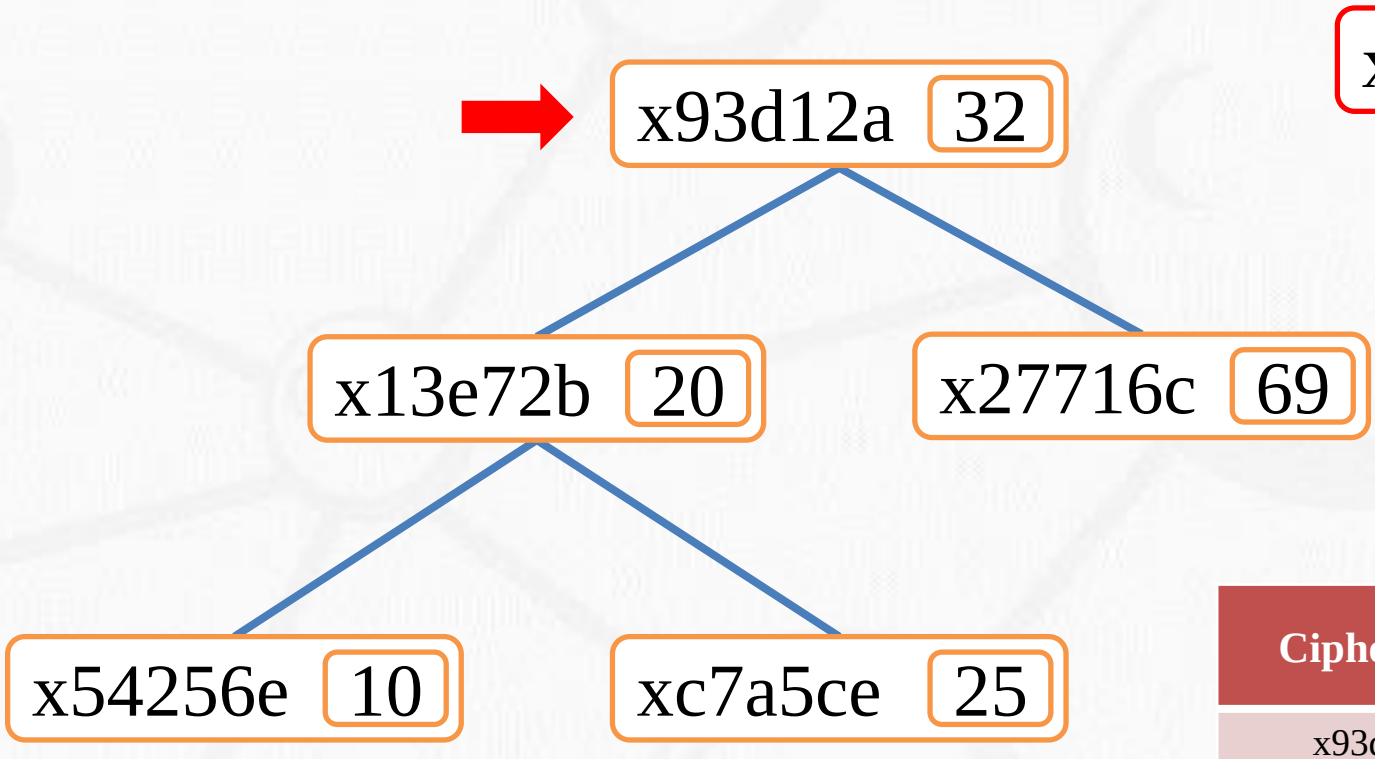
明文:	69	32	20	10	25
密文:	5	4	2	1	3

- Popa等[1]提出的mOPE



[1] R Popa, F Li, N Zeldovich. An ideal-security protocol for order-preserving encoding[C]. IEEE S&P. 2013: 463-477.

§5.1.1 保序加密技术 - 实例2(Popa等) 续1

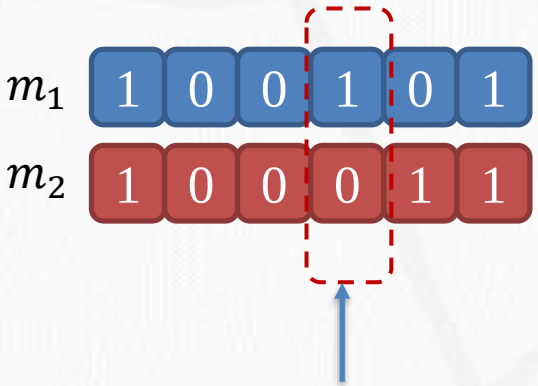


xd3ab42 23

Ciphertext	OPE Encoding [path]10…0
x93d12a	[]100=decimal 4
x13e72b	[0]10=decimal 2
x27716c	[1]10=decimal 6
x54256e	[00]1=decimal 1
xc7a5ce	[01]1=decimal 3

§5.1.1 保序加密技术 - 实例2(Popa等) 续2

- 现象:
  - 仍然可以进行任意明文的比较。
  - 需要在用户和服务器之间进行交互。
- 存在的问题:
  - 任意攻击者可以对密文进行比较，造成密文数据的滥用。
  - 存在交互，效率很低。
  - 需要密文映射表才能解密。
- 如何解决问题?
  - 除了顺序外，再多泄露一点点信息。



$\mathrm{ind}_{\mathrm{diff}}(m_1, m_2)$: 第一个不相同的比特位

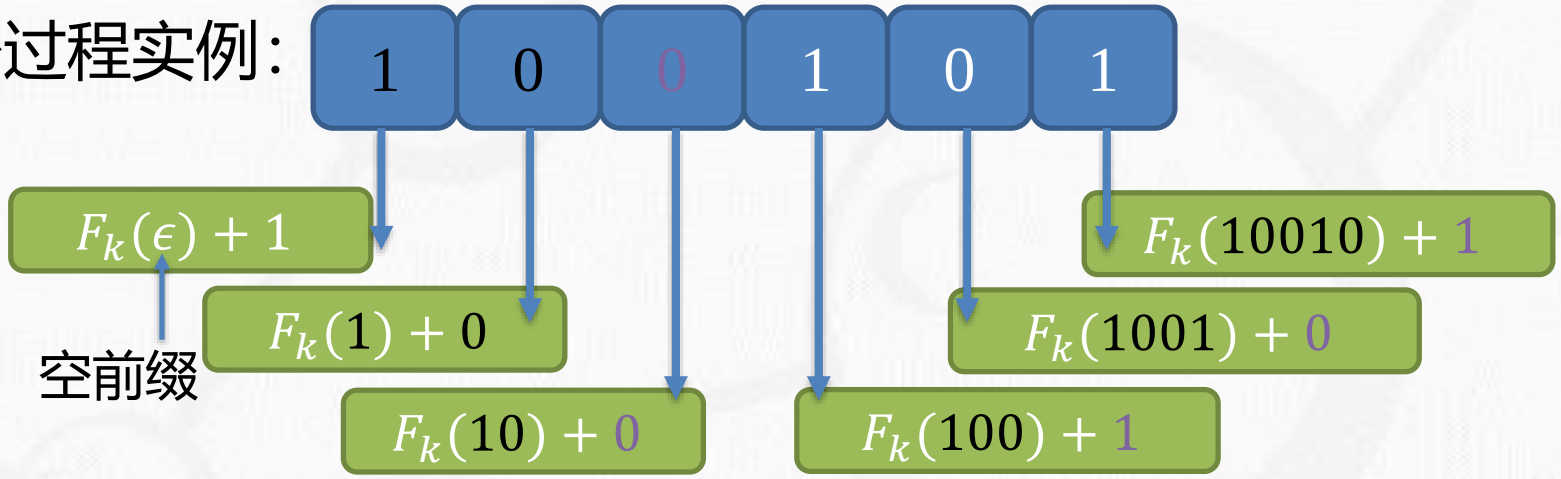
§5.1.1 保序加密技术 - 实例4(Chenette等)

- 揭序加密(Order-revealing encryption)：一种有陷门的顺序可见加密方案。
  - 伪随机函数(Pseudorandom function, PRF) F 的密钥 k，$m = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$。
  - 加密：$c = \{u_i\}_{i=1}^{n}, u_i = F(k, (i, b_1 b_2 \dots b_{i-1} || 0^{n-i})) + b_i \bmod M, M \geq 3$。
  - 比较：c和c'的大小。
    1. 找到第一个不相同的u_i和u_i'。
    2. 如果没找到，返回$c_i = c_i'$。
    3. 如果两个密文第i个位不同：如果$u_i' = u_i + 1 \bmod M$，则$c_i < c_i'$；否则$c_i > c_i'$。
  - 解密：$b_i = F(k, (i, b_1 b_2 \dots b_{i-1} || 0^{n-i})) \oplus u_i$

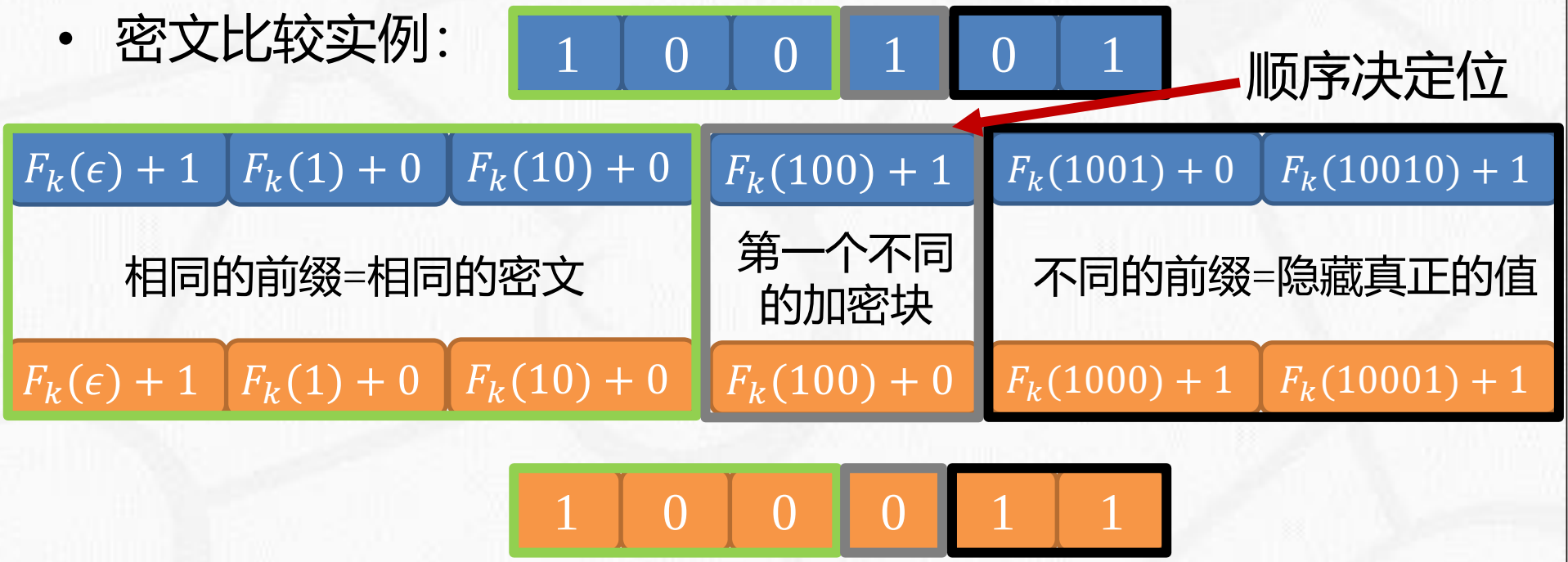
[1] N Chenette, K Lewi, S A Weis, D J Wu. Practical Order-Revealing Encryption with Limited Leakage[C]. Fast Software Encryption. 2016: 474-493.

§5.1.1 保序加密技术 - 实例4(Chenette等)续1

- 加密过程实例：

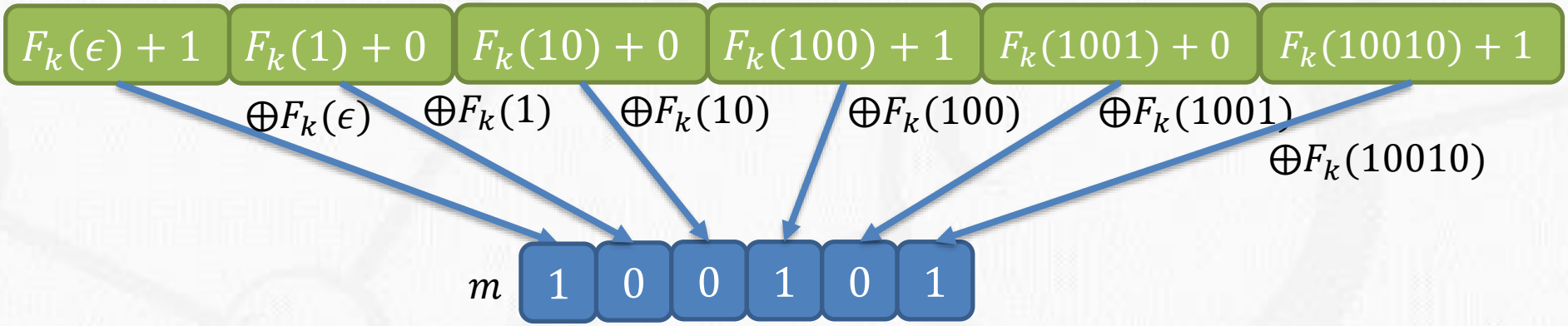


- 密文比较实例：

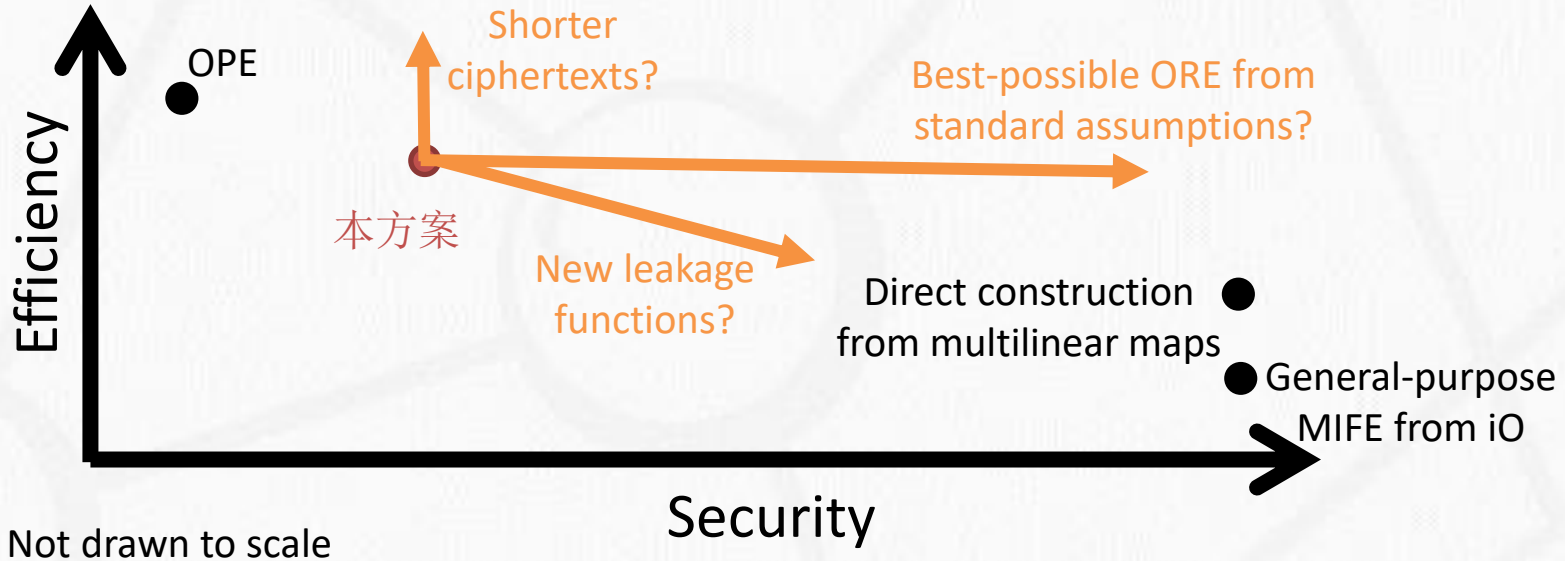


§5.1.1 保序加密技术 - 实例4(Chenette等)续2

- 解密过程实例：F, k



- 未来研究方向：



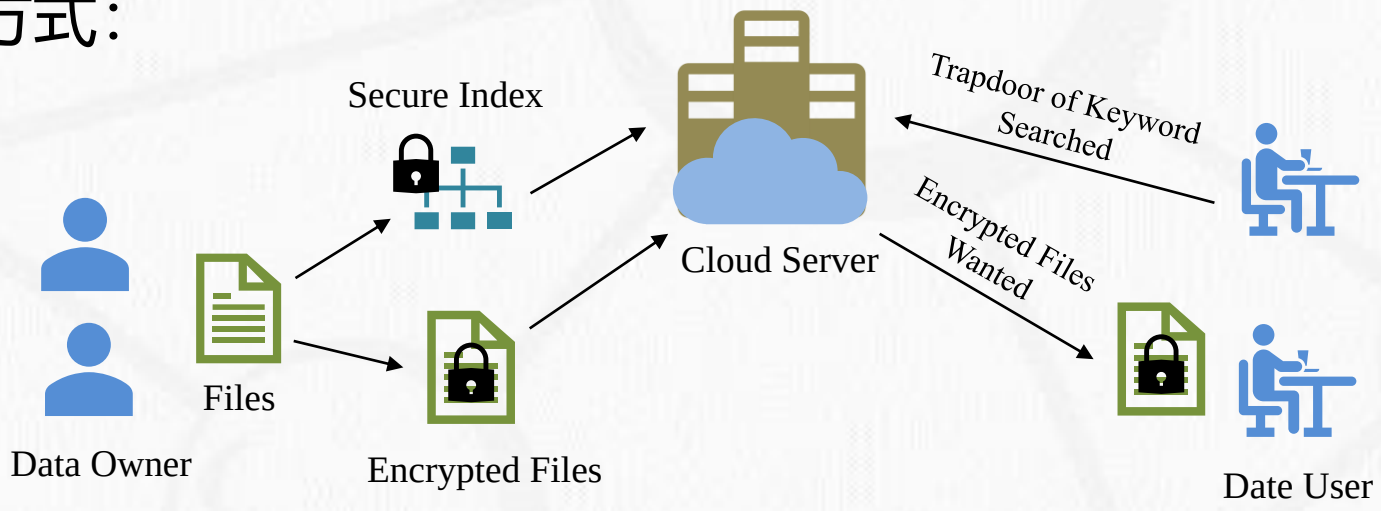
西安電子科技大學
XIDIAN UNIVERSITY

在密文数据上保持明文的可搜索语义

§5.2 可搜索加密技术

§5 可搜索加密技术 - 云端搜索的重要性

- 可搜索加密(Searchable encryption, SE) [1]：允许用户将数据以一种能够保证隐私的形式外包给第三方，同时保证用户通过特定途径能够在外包的数据上进行检索。
- 保证隐私的方式：
  - 加密
- 第三方：
  - 公有云
- 特定途径：
  - 使用检索令牌



[1] X Song, D Wagner, A Perrig. Practical techniques for searches on encrypted data[C]. IEEE S&P. 2000: 44–55.

§5.2 可搜索加密技术 - 类型

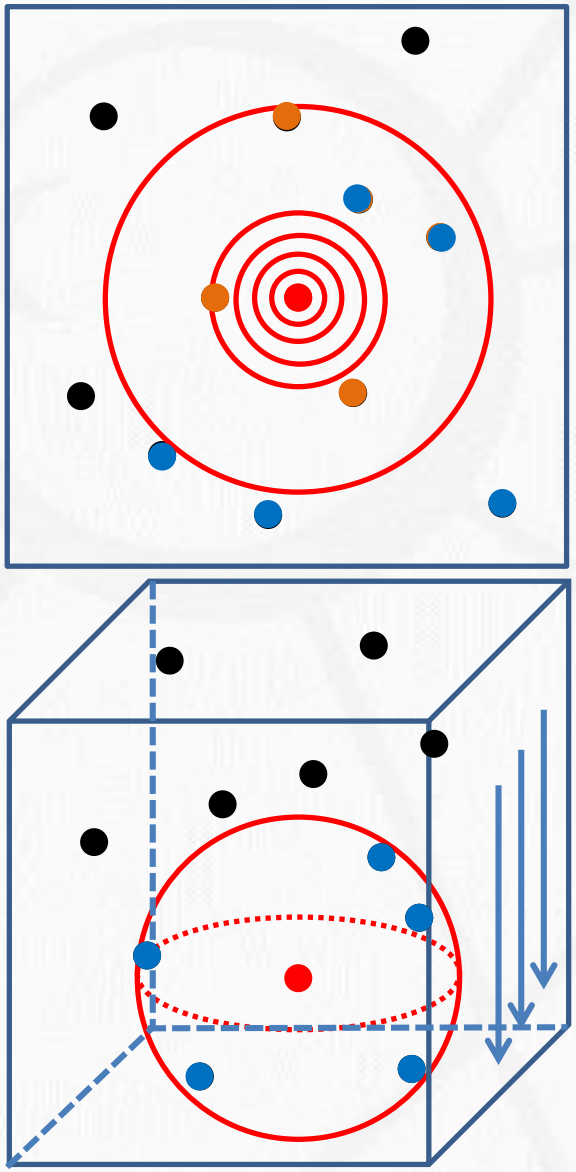
- 根据对象不同
  - 关键词、一维数据、多维数据(关系型数据、时空数据)、高维数据(图像特征)
- 根据采用的密码技术不同
  - 对称可搜索加密、非对称可搜索加密、匿名可搜索技术

多维数据、高维数据

§5.2.1 多维数据安全检索

§5.2.1 多维数据安全检索 - 最近邻检索

- 最近邻(NN)查询
  - 寻找与目标点距离最近的点。
- k最近邻(kNN)
  - 寻找与目标点距离最近的k个点。
- 近似最近邻(ANN)
  - kNN的相似解。

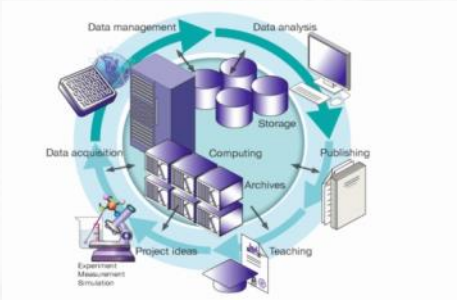


§5.2.1 多维数据安全检索 - 最近邻检索例子

- Beyer et al. (1999)
  - “维度灾难”，在高维空间中，任意两点间距离极其接近。

- 近似最近邻（ANN）应用场景

Computer Vision



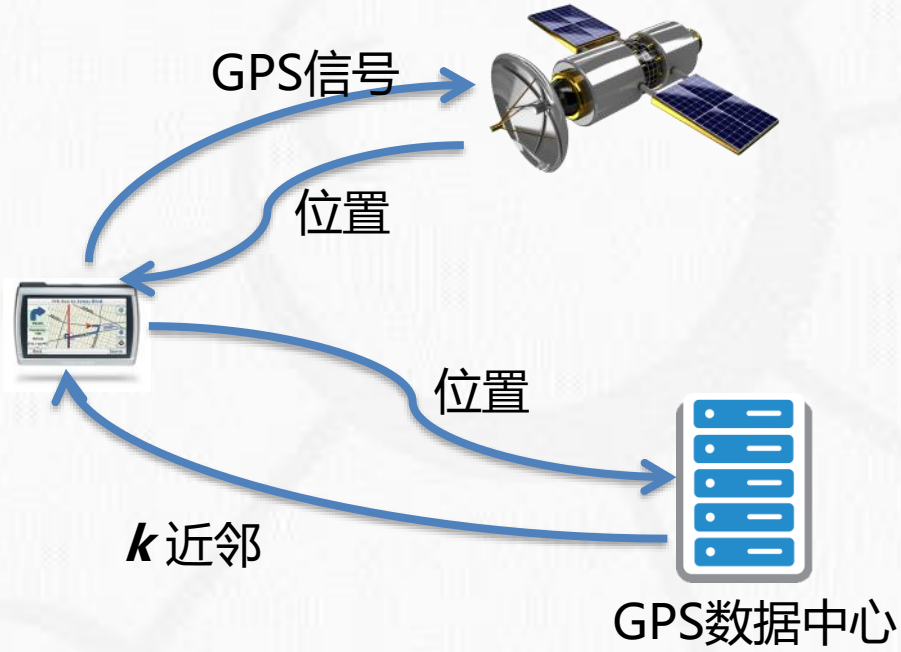
Data Management

GIS

- 近似最近邻的本质
  - 效率和准确性的折衷。

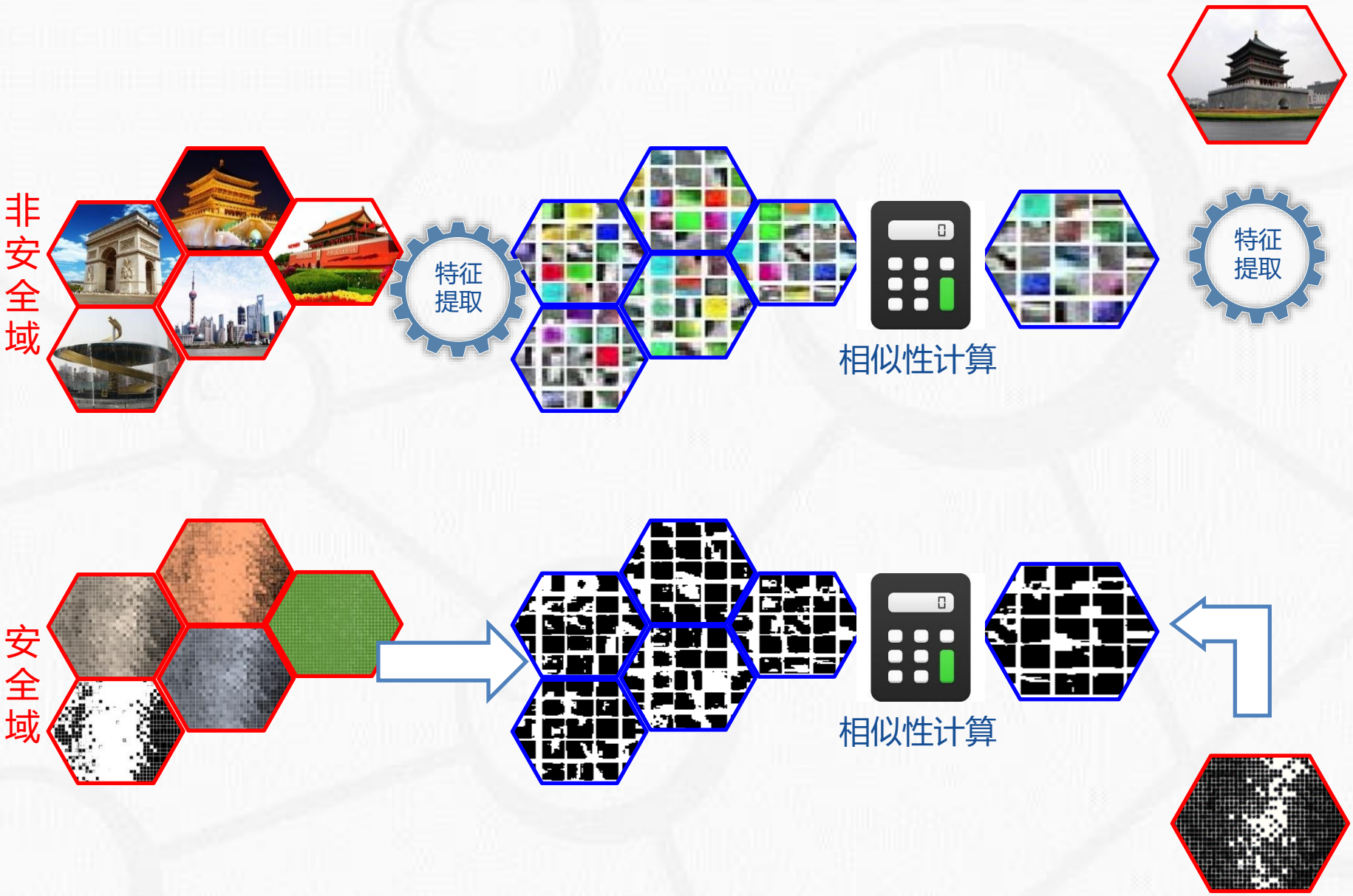
§5.2.1 多维数据安全检索 - GIS的例子

- 地理信息系统(GIS: Geographic Information System)
  - 位置隐私性
  - 需要安全传送
- 目标:
  - 保护用户位置不被泄露



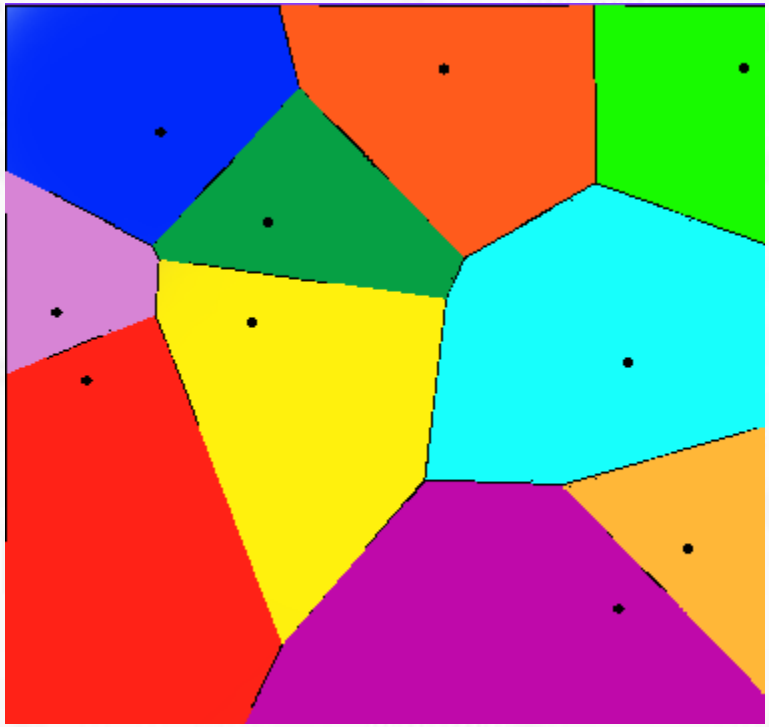
用户的查询（位置）被保护！

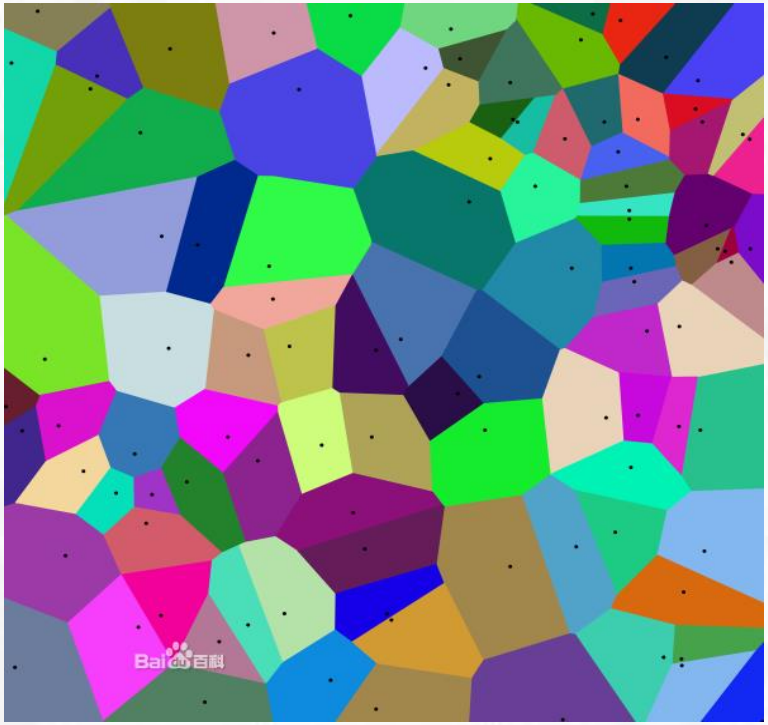
§5.2.1 多维数据安全检索 - 图像检索的例子



§5.2.1 多维数据安全检索 - 泰森多边形

- 泰森多边形
  - 将空间划分为多个区域的典型方法。

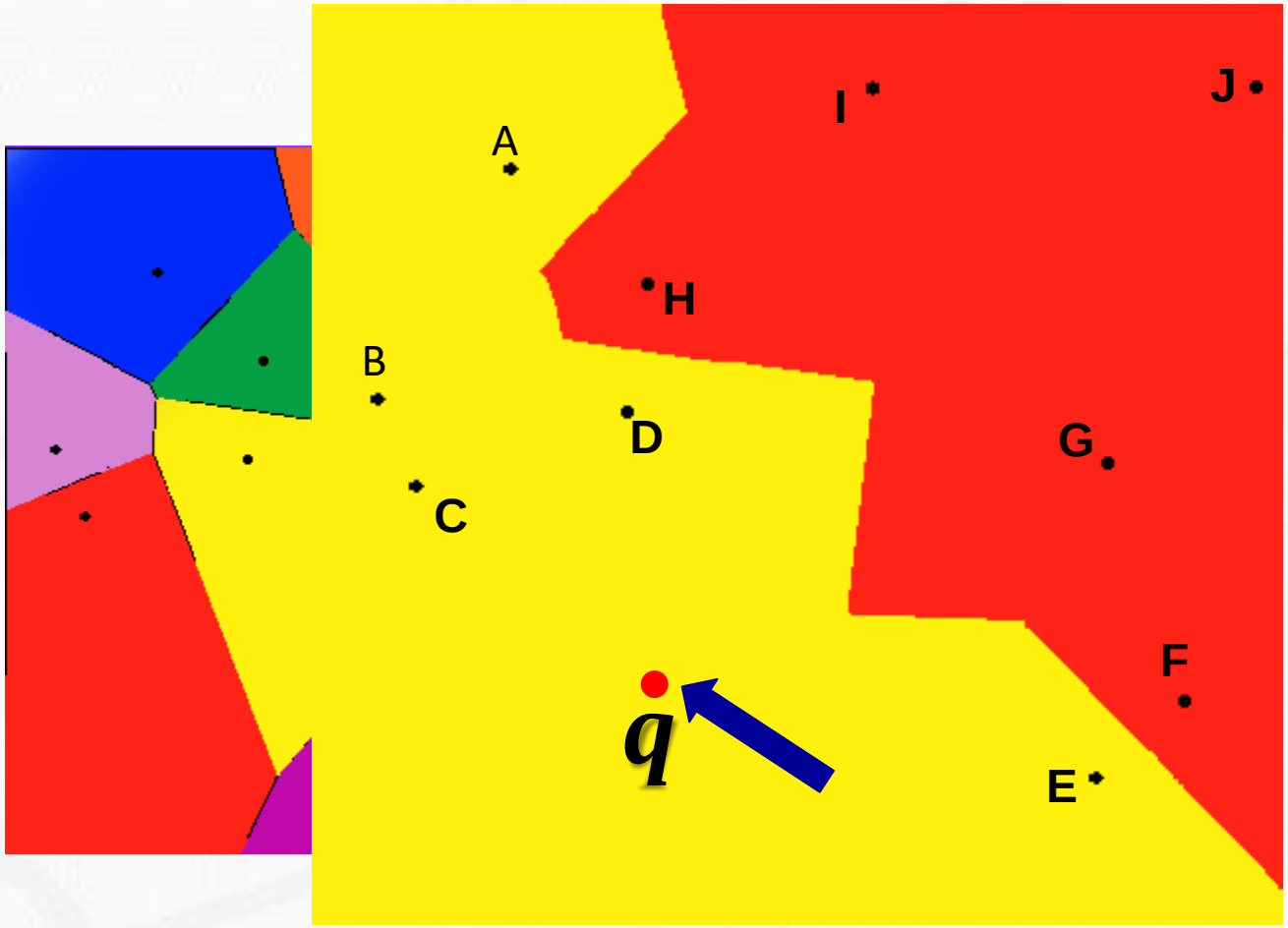




- 每个区域内包含离中心点最近的所有点。

§5.2.1 多维数据安全检索 - 简单的近邻检索思路

- 简单的近邻检索思路



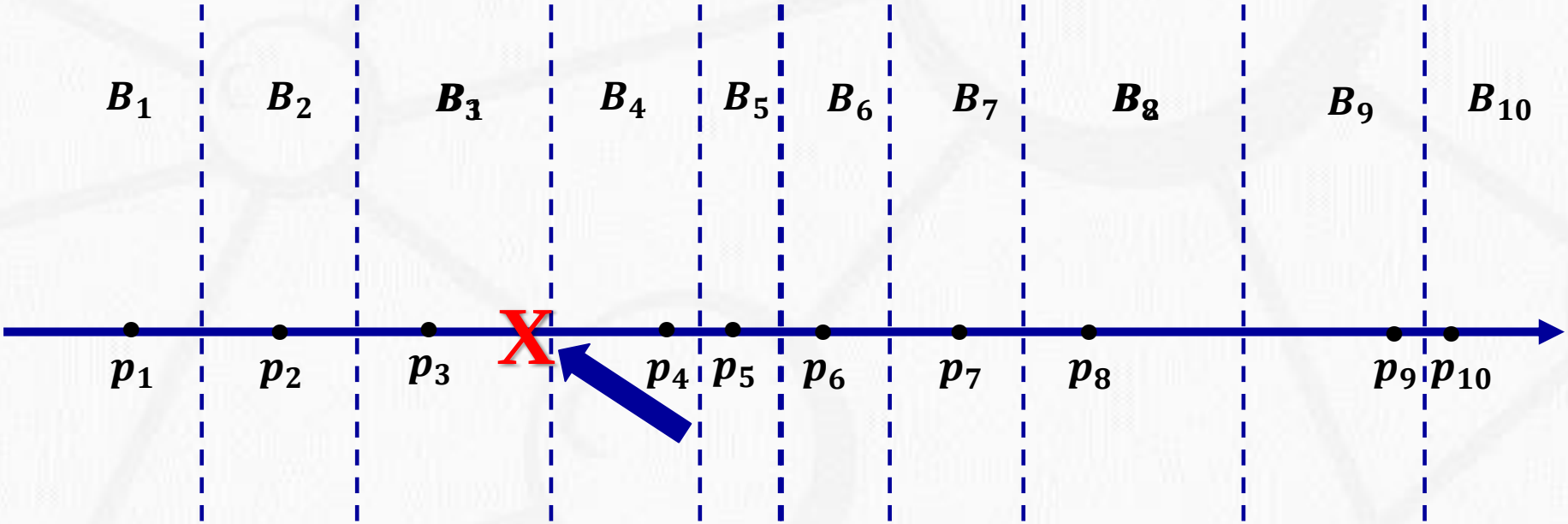
§5.2.1 多维数据安全检索 - 问题及解决方案

- 问题:
  - 如何确定一个查询落在哪个区域?
  - 如何将一个图划分成若干区域?
  - 如何确保每个区域有相同的点的数量?

- 主要结果:
  - 针对一维数据的分区方法、
  - 三个针对二维数据的分区方法
    - Square Grid(SG)
    - Minimum Space Grid(MinSG)
    - Minimum Max partition(MinMax)

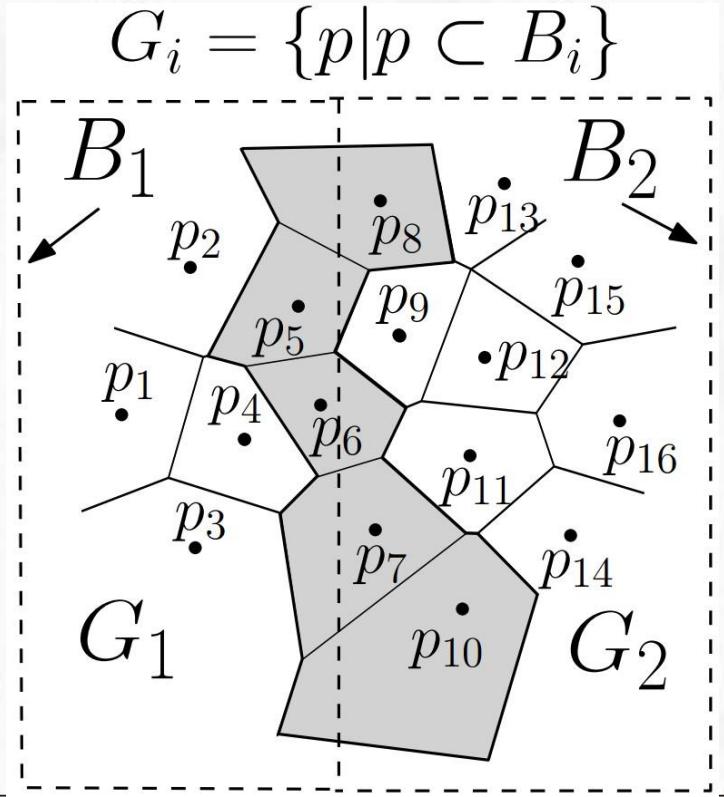
§5.2.1 多维数据安全检索 - 一维数据分区方法

- 需求:
  - 垂直分界线是没有意义的;
  - 不存在临界区域的概念。



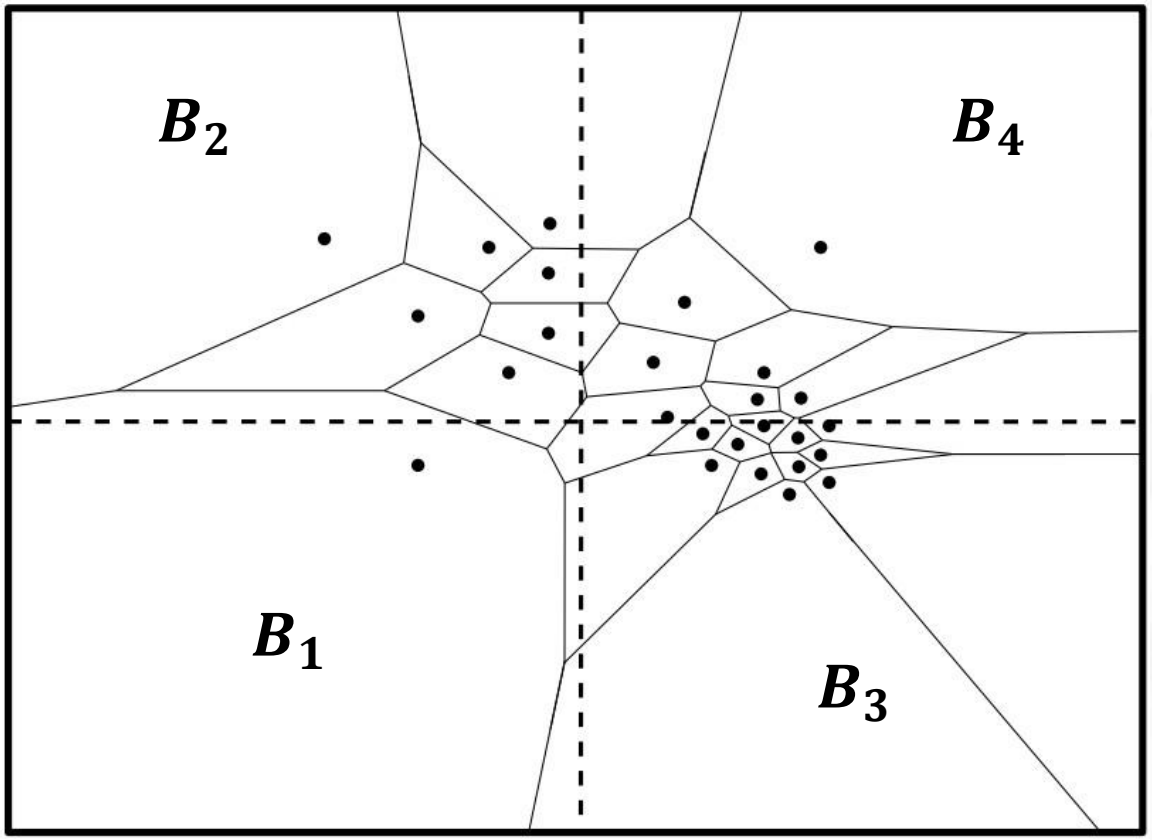
§5.2.1 多维数据安全检索 - 二维数据分区方法

- 定义:
  - D是二维坐标数据集
  - 每一个分区 (i) 对应每一个网格 B，(ii) 包含所有与当前网格B有重叠的泰森多边形
  - $G_i = \{p | p \in B_i\}$



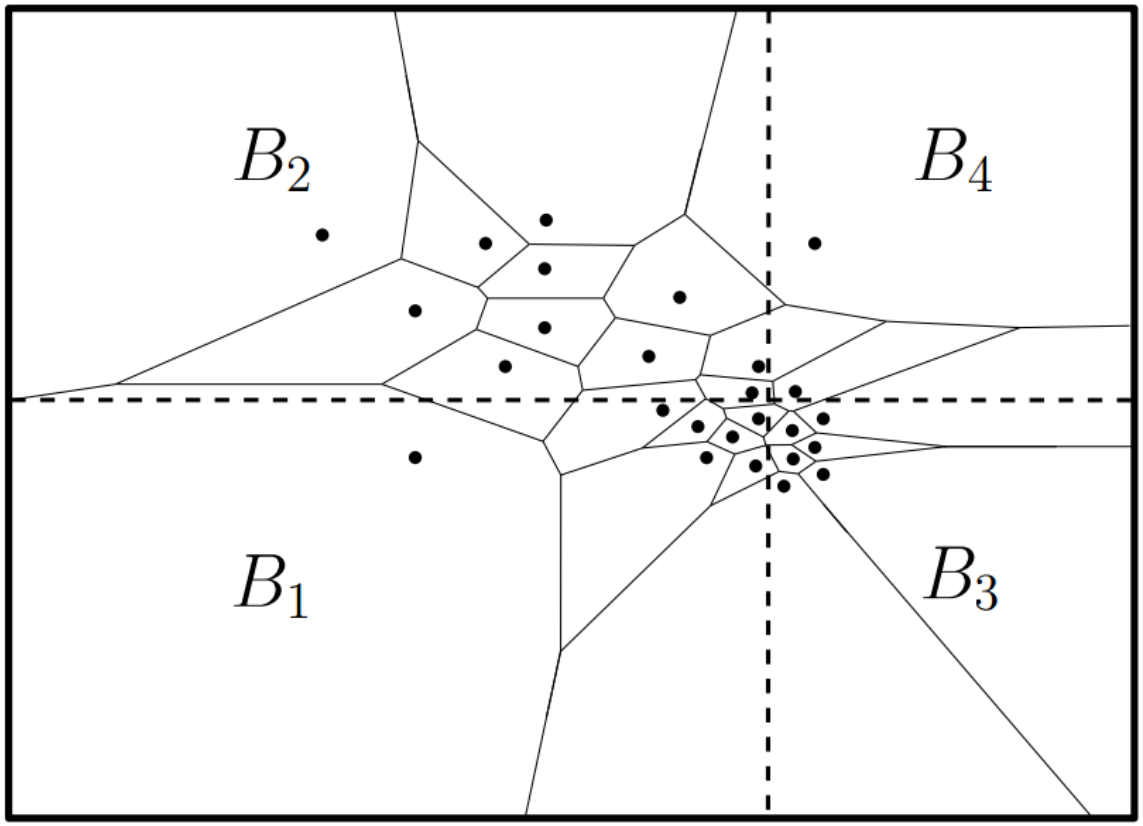
- Sample:
  - $G_1 = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_{10}\}$
  - $G_2 = \{p_6, p_7, \ldots, p_{16}\}$

§5.2.1 多维数据安全检索 - SG方法



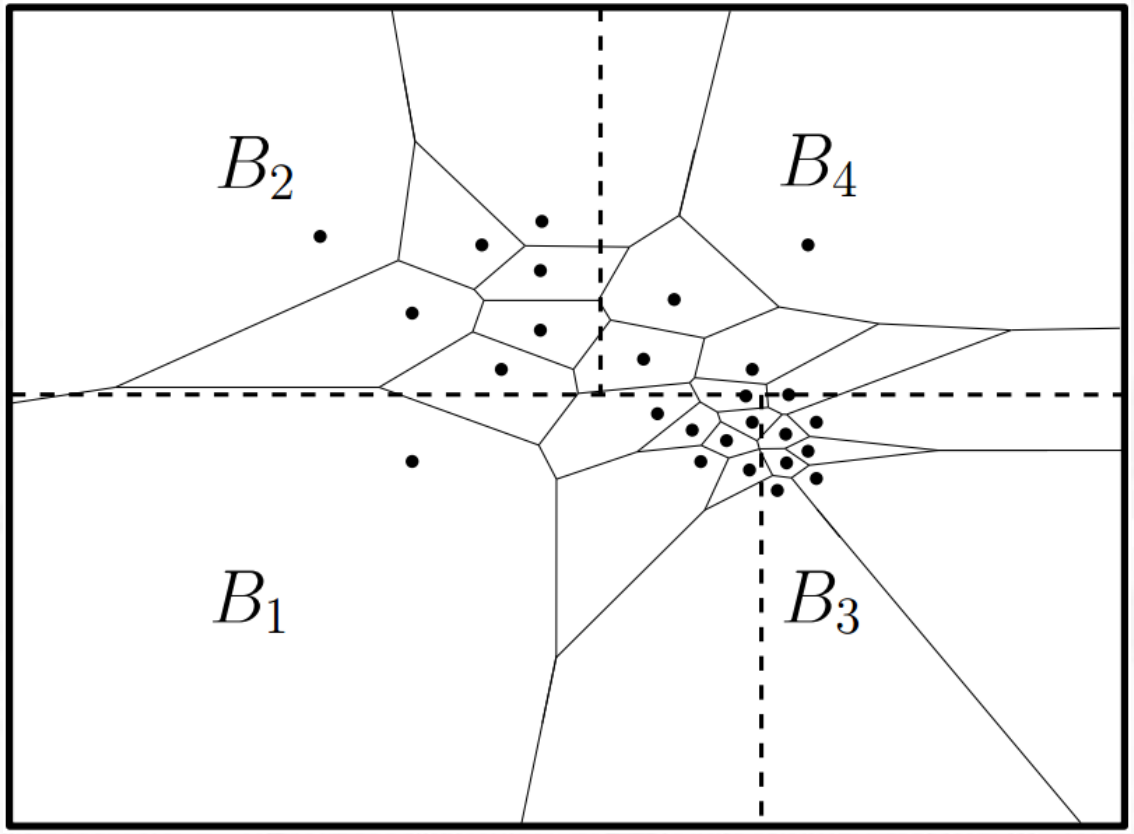
- 问题：$|B_3| \gg |B_i|$，其中 $i = 1,2,4$。

§5.2.1 多维数据安全检索 - MinSG方法



- 问题：$|B_4| \ll |B_i|$，其中 $i = 1,2,3$。

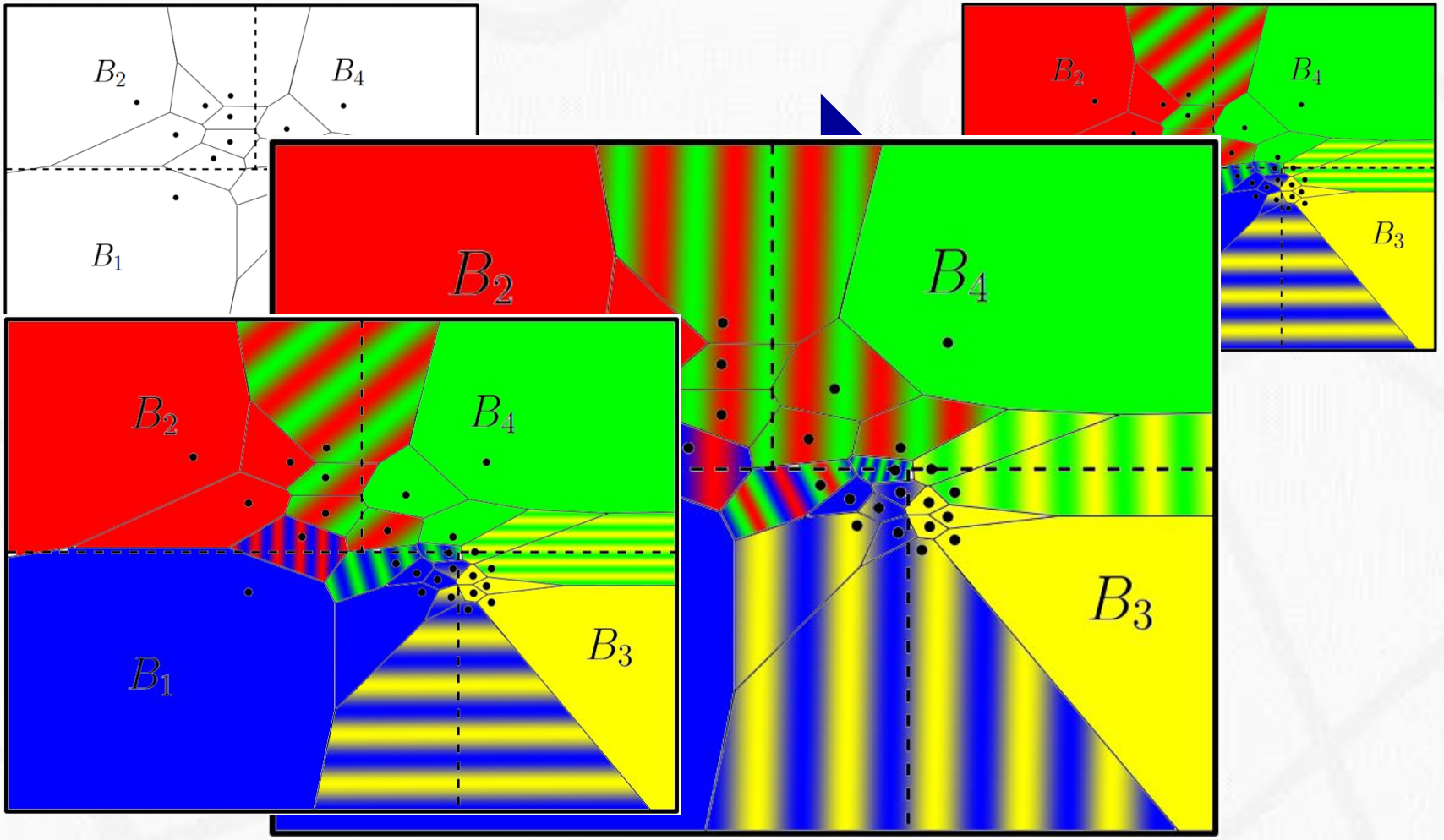
§5.2.1 多维数据安全检索 - MinMax方法



- 问题：对于 SG、MinSG和 MinMax, $|B_i| \neq |B_j|$，其中 $i \neq j$.

§5.2.1 多维数据安全检索 - 分区方法样例

- B_4包含12个点，其它的区域也扩展到12个点。



[1] Li F, Xiao X. Secure nearest neighbor revisited[C]. IEEE ICDE. 2013: 733-744.

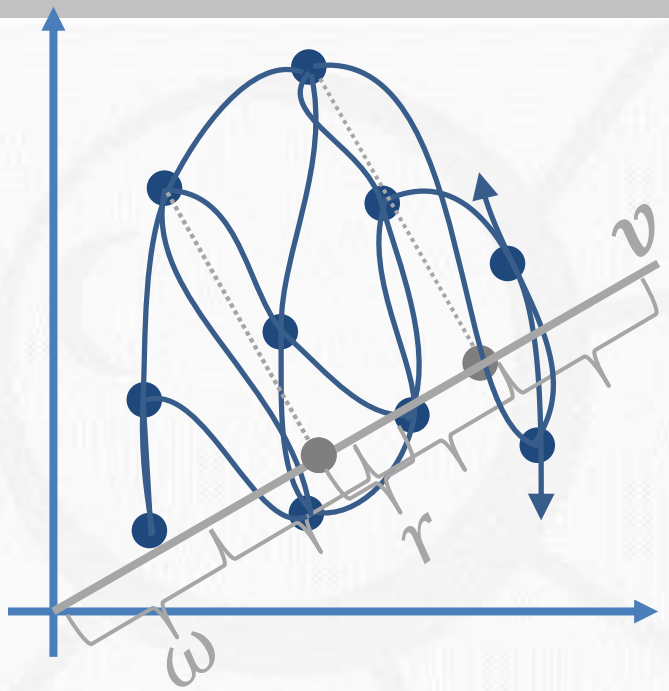
§5.2.1 多维数据安全检索 - 安全范围检索

借助保序加密实现安全范围检索！

§5.2.1 多维数据安全检索 - LSH

- Datar et al. (2004)
  - 多、高维数据的排序问题;
  - 点到数的转换。

$$h(\boldsymbol{v}) = \left\lfloor \frac{\boldsymbol{\theta} \cdot \boldsymbol{v} + r}{\omega} \right\rfloor$$



- (R_1, R_2, P_1, P_2)-敏感哈希
  - 对于$||\boldsymbol{q} - \boldsymbol{v}|| \le R_1$, $\Pr[h(v) = h(q)] \ge P_1$;
  - 对于$||\boldsymbol{q} - \boldsymbol{v}|| \ge R_2 = cR_1$, $\Pr[h(v) = h(q)] \le P_2$;

$$P_1 = \int_0^{\omega} f(t)\left(1 - \frac{t}{\omega}\right)dt, P_2 = \int_0^{\omega} \frac{1}{c} f\left(\frac{t}{c}\right)\left(1 - \frac{t}{\omega}\right)dt,$$

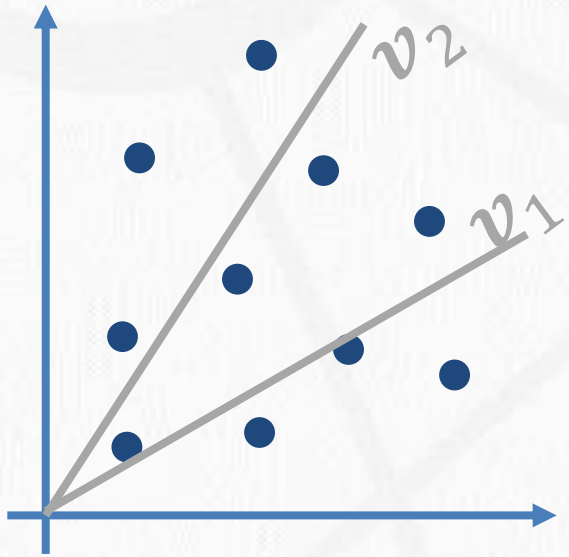
§5.2.1 多维数据安全检索 - 变种LSH

- 变种的位置敏感哈希

$$h(\boldsymbol{v}) \equiv \left\lfloor \frac{\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{r}}{\omega} - \frac{\min_{\boldsymbol{p}\in\mathbb{D}}\{y(\boldsymbol{p})\}}{\varpi} \right\rfloor$$

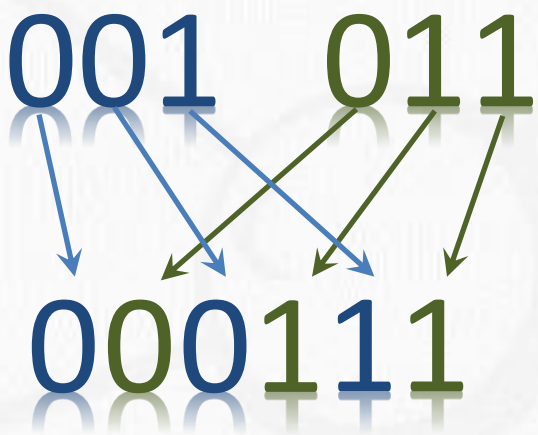
  - $y(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{\theta} \cdot \boldsymbol{v}$，其中$\varpi = (\max_{\boldsymbol{p}\in\mathbb{D}}\{y(\boldsymbol{p})\} - \min_{\boldsymbol{p}\in\mathbb{D}}\{y(\boldsymbol{p})\}) \cdot 2^{-\lambda}$。

- 复合敏感哈希函数
  - $G_m(\boldsymbol{v}) = (h_1(\boldsymbol{v}), h_2(\boldsymbol{v}), \ldots, h_m(\boldsymbol{v}))$。



§5.2.1 多维数据安全检索 - 复合编码

- 给定：
  - $\boldsymbol{p}_1 = (2.5,2)$，$\alpha_1 = (7,1)$，$\varpi_1 = 11.5$
- 可得：
  - $G_m(\boldsymbol{p}_1) = (1,3)$
- 编码值：




```
1: function CODE(p, H, λ, m)
2:     Compute the compound LSH value H_p = (h_1, h_2, ..., h_m);
3:     c = ∅;
4:     for each i = 1 to λ do
5:         for each j = 1 to m do
6:             The i−th bit of h_j is embedded into c;
7:         end for
8:     end for
9:     return c;
10: end function
```

§5.2.1 多维数据安全检索 - 方案比较

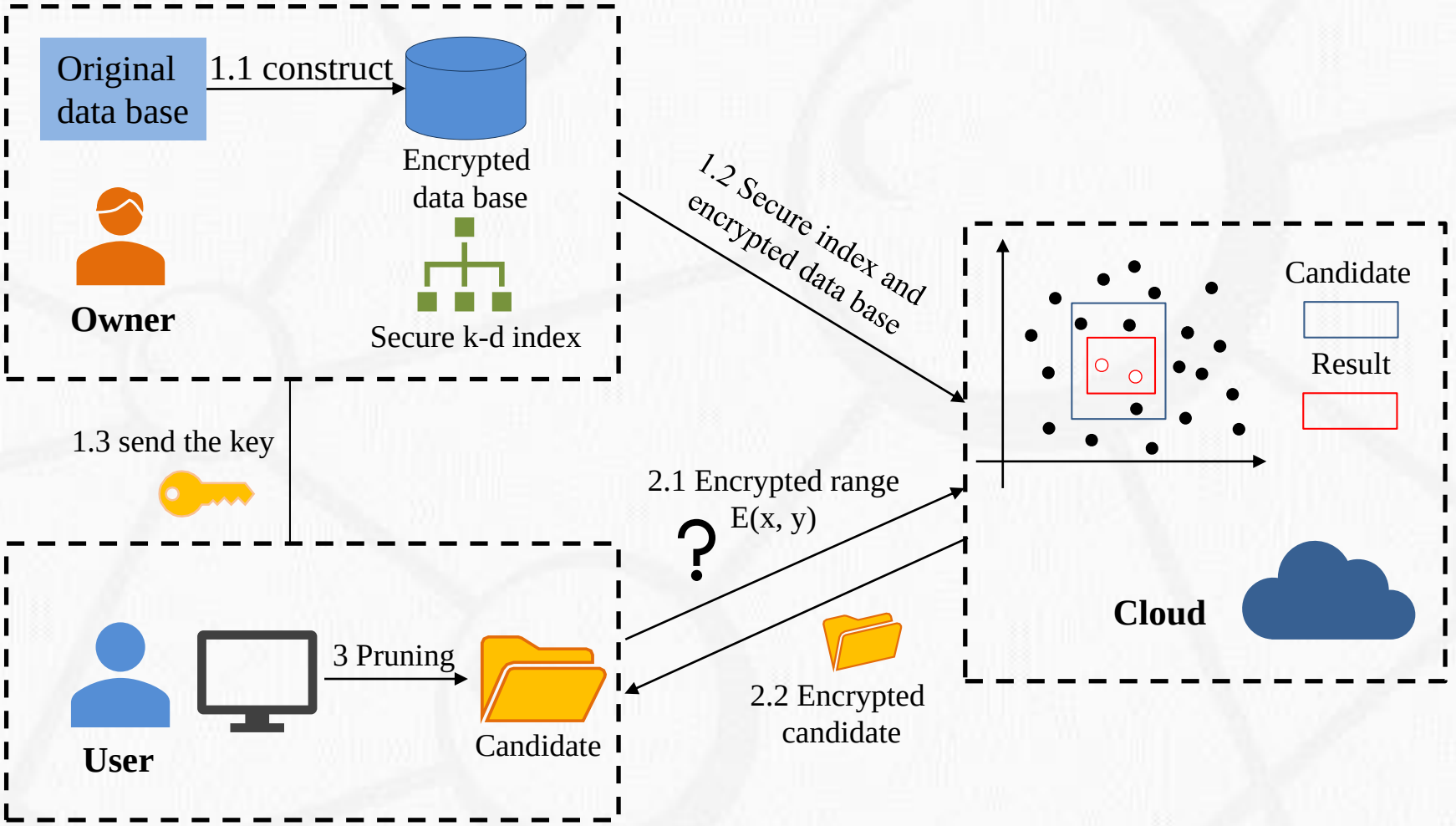
- CRT:
  - 结合 R*-树 和AES加密。

探讨方案

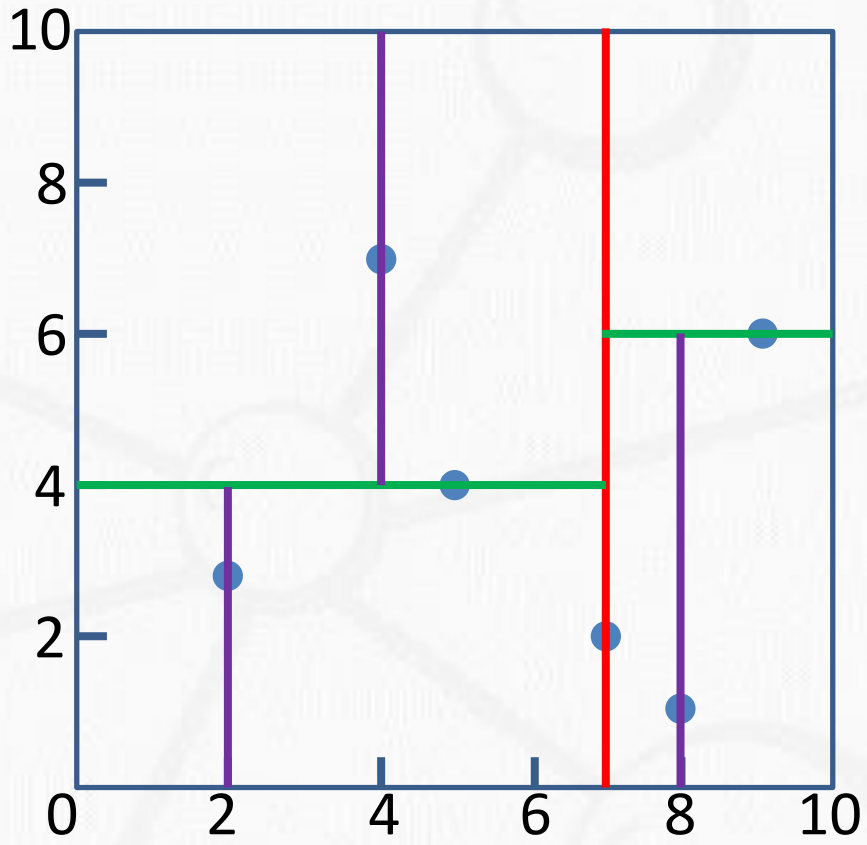
Table I: Roughly comparisons between SKD and CRT

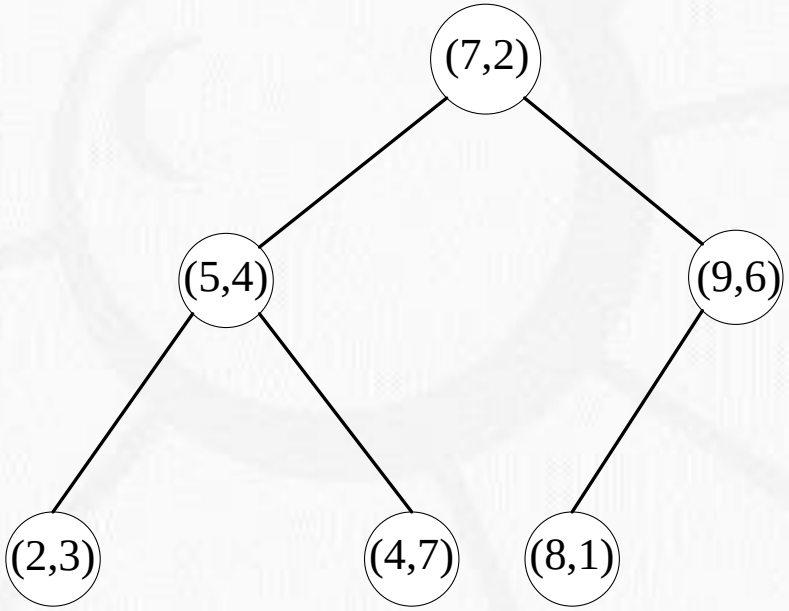
	CRT	SKD
Index Structure	R* tree	k-d tree
Encryption Scheme	AES	CE and AES
Overhead of user end	High	Low
Round trip	Tree height	1
Communication cost	High	Low

§5.2.1 多维数据安全检索 - 方案概览



§5.2.1 多维数据安全检索 - 安全KD树

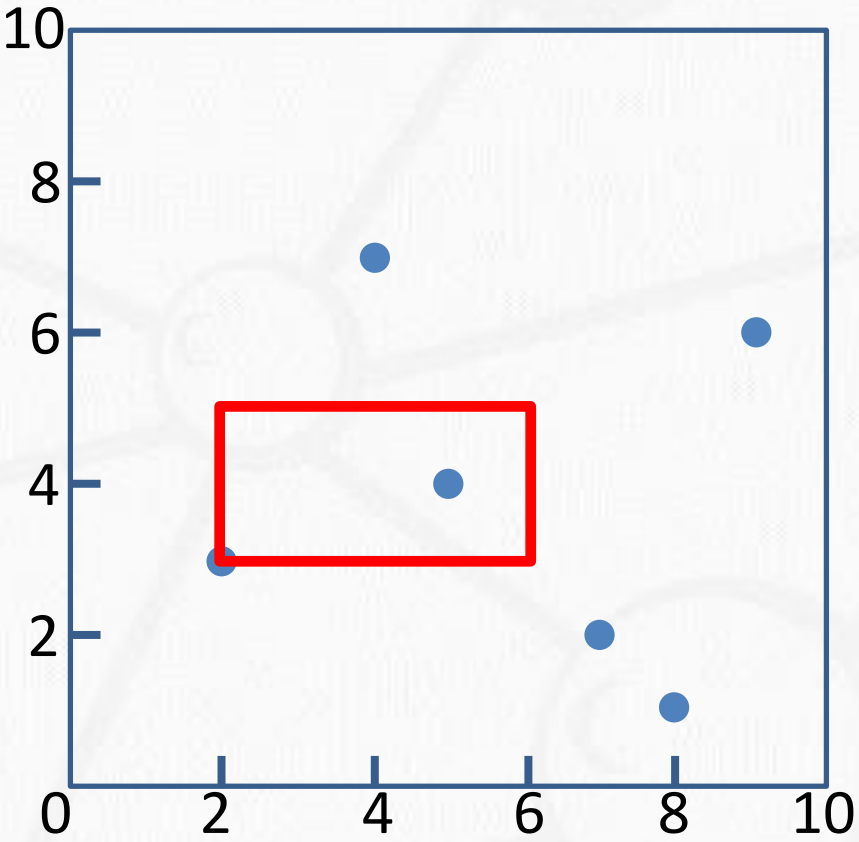


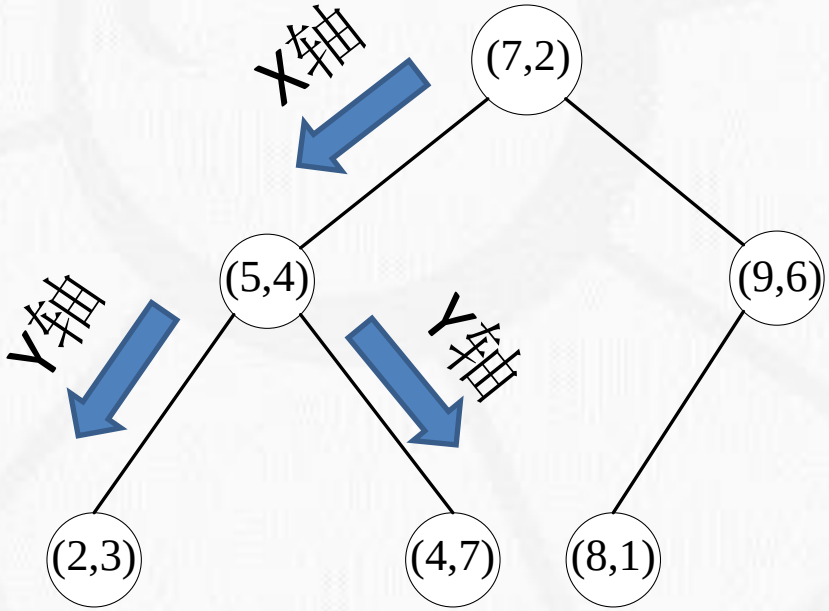


- 节点的每个分量采用保序加密(比如CE) 进行加密。

§5.2.1 多维数据安全检索 - 安全查询实现

- $Q=\{(2,3),(6,5)\}$





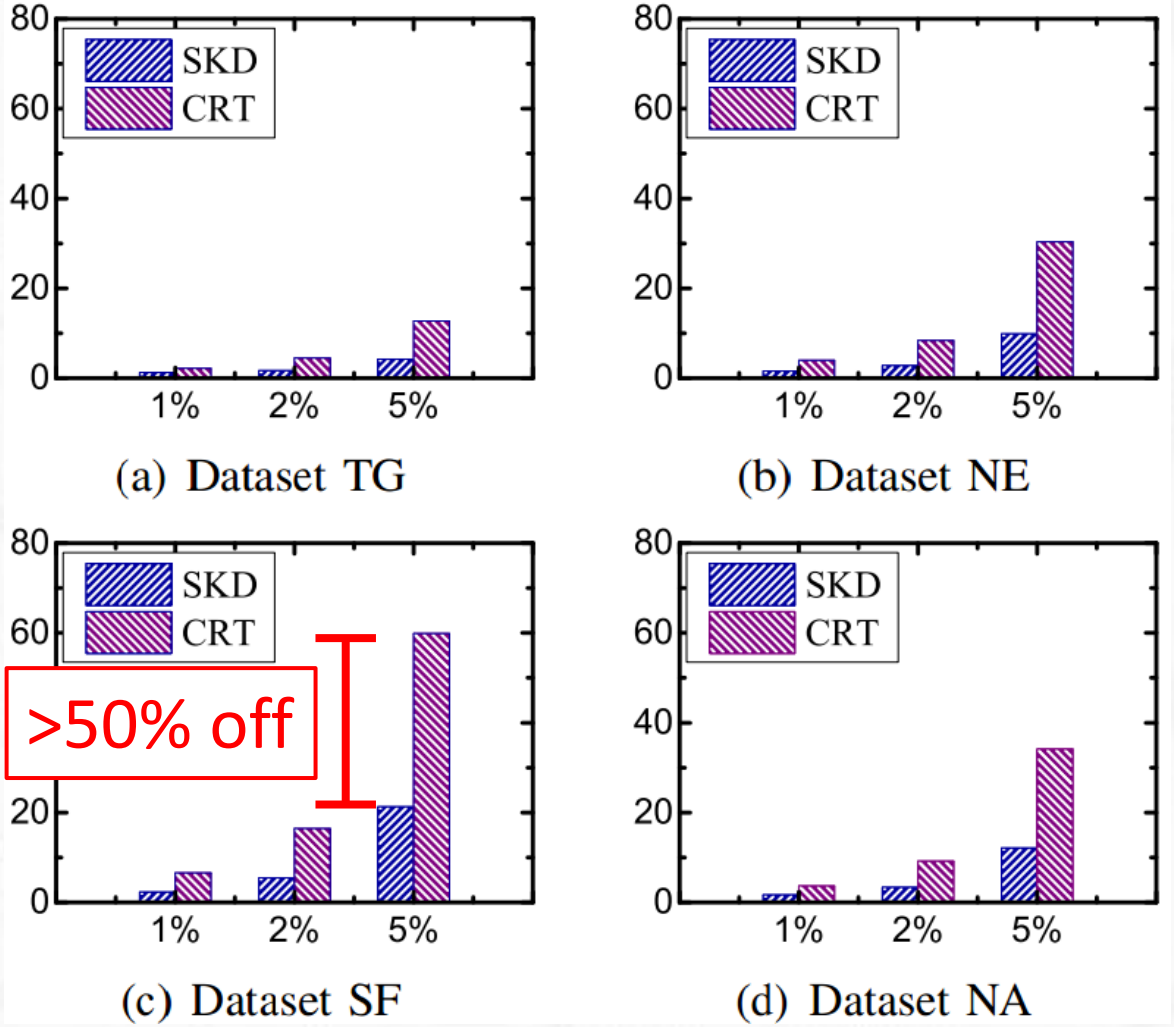
§5.2.1 多维数据安全检索 - 数据集

名称	范围	d	规模
TG	圣华金县	2	18,263
SF	旧金山路网	2	174,956
NA	美国北部路网	2	175,813
NE	三座城市的邮件地址	2	123,593

- 分别选取整个区间的1%, 2%, 5% 作为查询。

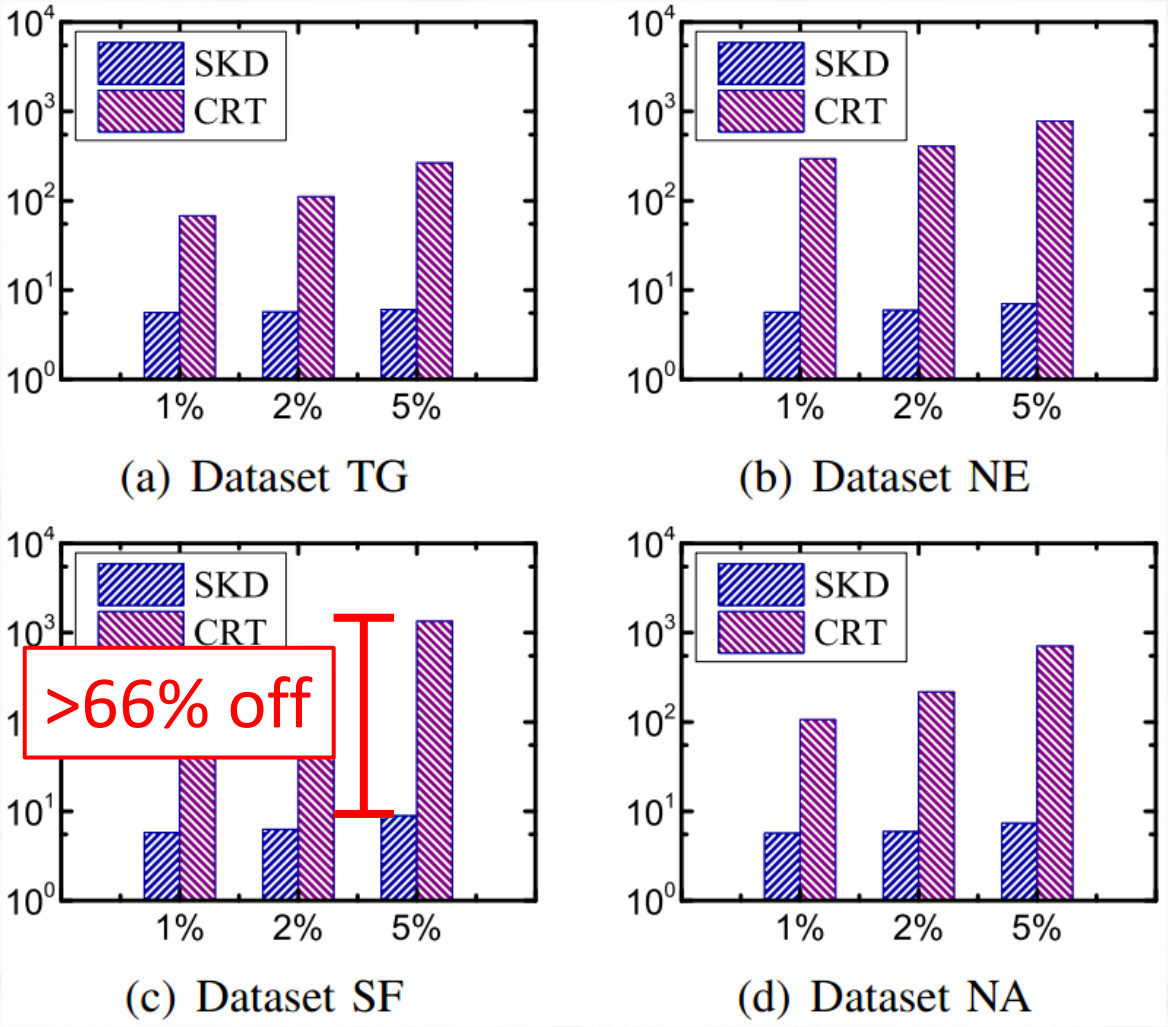
§5.2.1 多维数据安全检索 - 实验结果（1）

- 通信开销 (KB)



§5.2.1 多维数据安全检索 - 实验结果（2）

- 用户CPU时间(ms)



§5.2.1 多维数据安全检索 - 实验结果（3）

- 通信轮数

数据集	查询范围(%)	SKD	CRT
TG	1/2/5	1/1/1	6/9/21
NE	1/2/5	1/1/1	10/16/48
SF	1/2/5	1/1/1	14/30/97
NA	1/2/5	1/1/1	9/18/57

Peng Yanguo, Li Hui, Cui Jiangtao, Zhu Yixiao, Peng Changgen. An efficient range query model over encrypted outsourced data using secure k-d tree.//*In NaNA 2016: 2016 International Conference on Networking and Network Applications, 2016*, pp. 250-253. doi:10.1109/NaNA.2016.31. (EI)

§5.1.1 保序加密技术 - 小结

- 内容回顾
  - 本节介绍了保序加密的技术发展，重点讲解了四个保序加密方案：OPE、mOPE、CE和ORE，分别针对保序加密的功能、效率、安全性进行了讲解。
  - 讲解了安全近邻检索、范围检索的内容。

- 掌握
  - IND-OCPA和IND-CPA的区别。
  - 安全近邻检索和范围检索的一般思路。

Thanks!
Questions & Advices!