微结构气体探测器通道编码复用方法研究

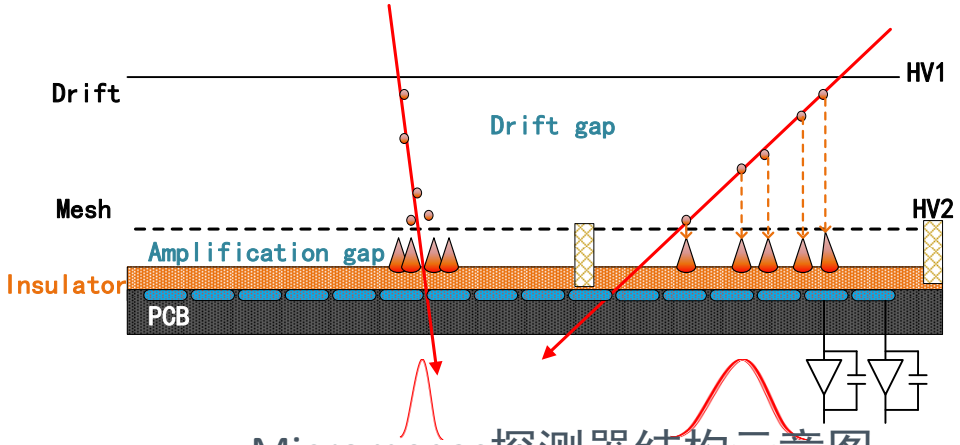
王宇，刘树彬，封常青，张志永，庄浩，丁正午
On behalf of μSTC group

中国科学技术大学
核探测与核电子学国家重点实验室

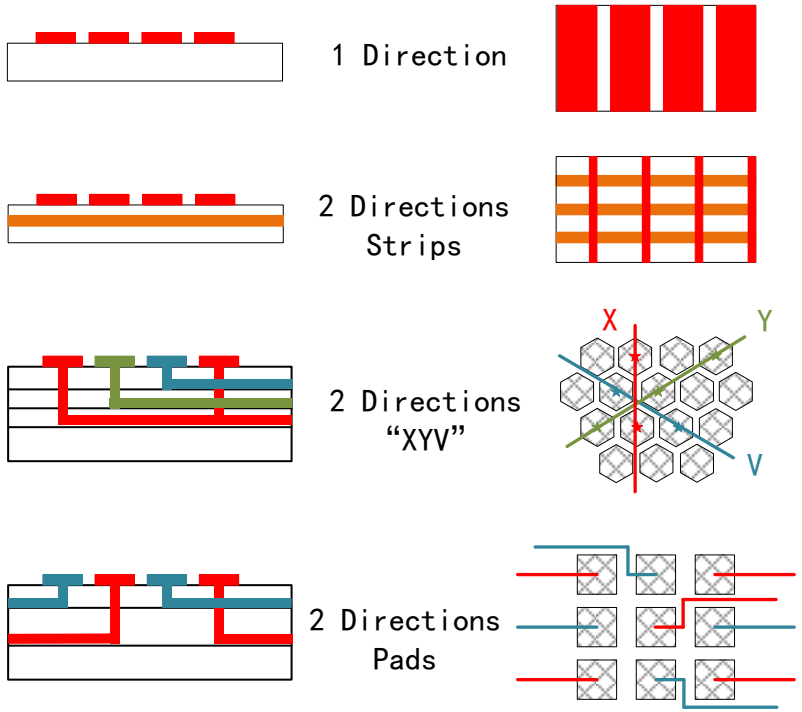
第二十二届全国核电子学与核探测技术学术年会暨第十二届全国先进气体探测器研讨会 (山东·青岛)

微结构气体探测器

- 电极距离极小的高颗粒度气体探测器
- 性能特点：高计数率能力、高位置分辨、较小离子和光子反馈、易于大面积制作等
- 读出单元类型
  - 条读出：一维、二维
  - 像素读出：“XVY” pads, 2D pads



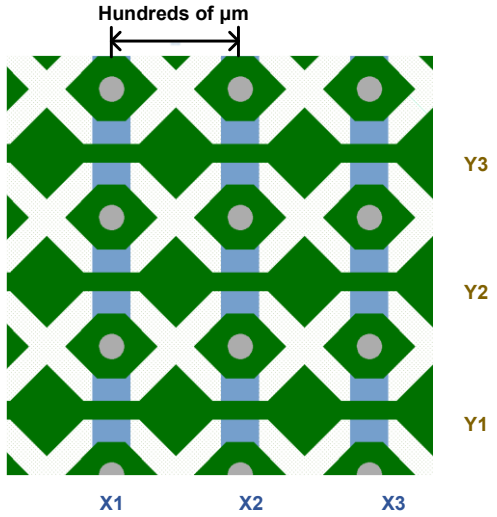
Micromegas探测器结构示意图

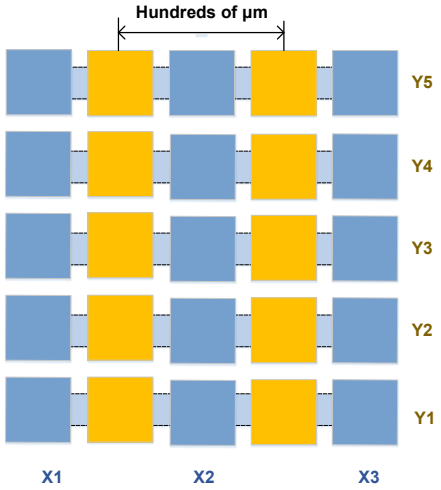


微结构气体探测器典型的读出电极结构

微结构气体探测器的读出挑战

- 大面积制作已成为微结构气体探测器应用的重要发展方向
- 需要大量的信号读出单元
  - 探测器的位置分辨取决于读出单元大小
  - 为了获得较好的位置分辨，读出单元大小通常被设计为几百微米量级

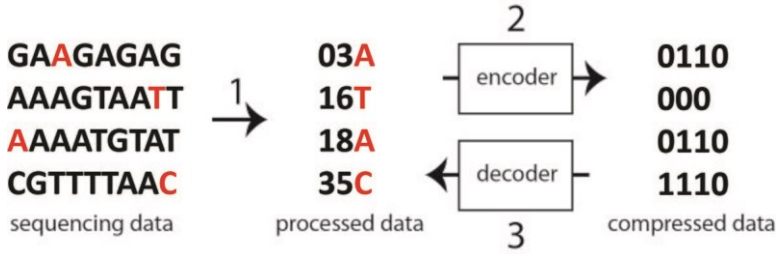




- 需要大量的读出电子学通道
  - 带来系统复杂度、功耗、处理能力和功耗的增加

编码压缩概念利用

› 类比于信息论中的压缩
  - 信息时代，海量信息，但有效信息稀疏
  - 编码压缩、压缩感知采样



› 用于微结构气体探测器读出中
  - 有效信号稀疏：通常单个事例信号击中在几个**相邻**读出条上
  - 改进探测器信号引出方法：采用编码复用，减少读出电子学通道数

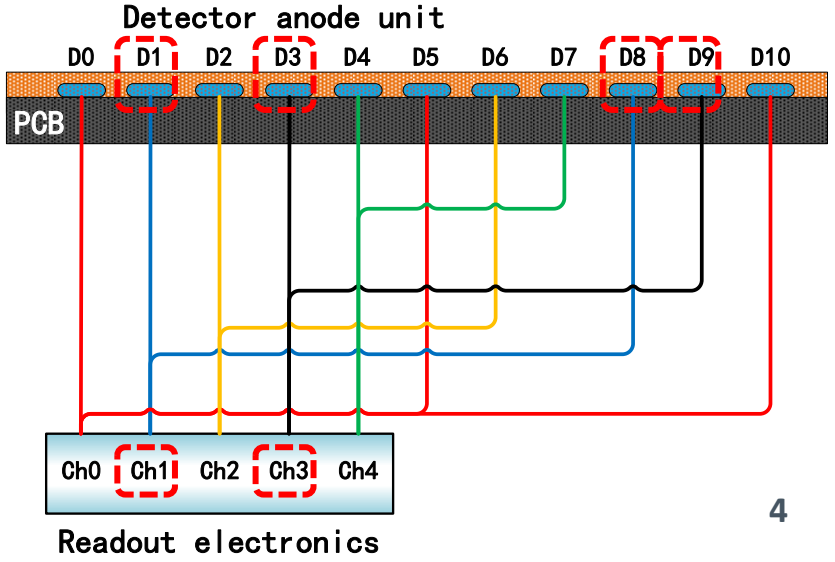
如：

1. 读出电子学通道 ch1和ch3探测到信号
2. 探测器侧可能的击中通道是：

   D1、D3、D8、D9

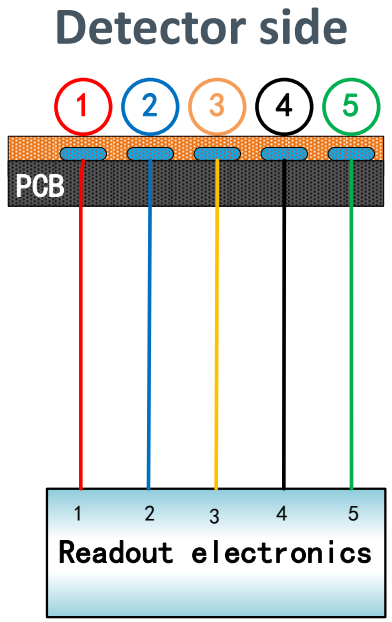
3.单个事例信号击中在几个相邻读出条上

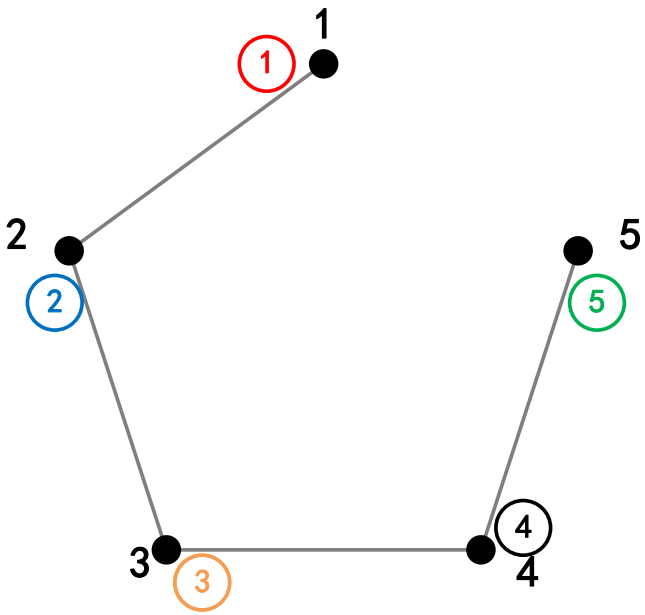
⇒真实的击中为：D8、D9

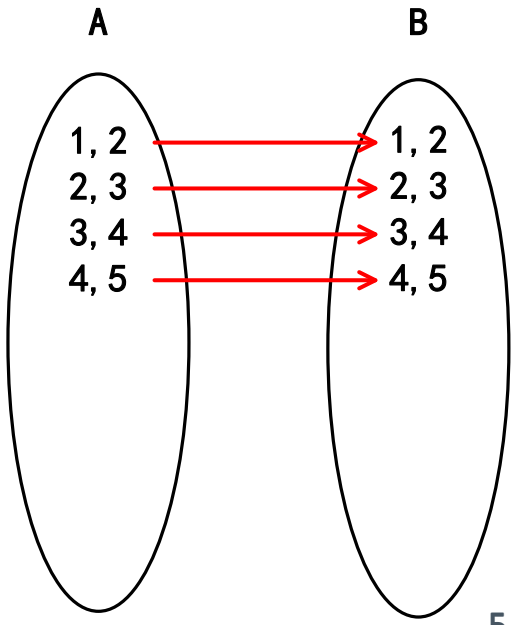


通道编码复用方法的构建

› 编码图理论
  - ①②③④⑤...代表探测器读出单元
  - 1, 2, 3, 4, 5, ... 代表电子学读出通道
  - **通道编码复用是将一对连续的探测器通道映射到一对唯一的电子学通道**

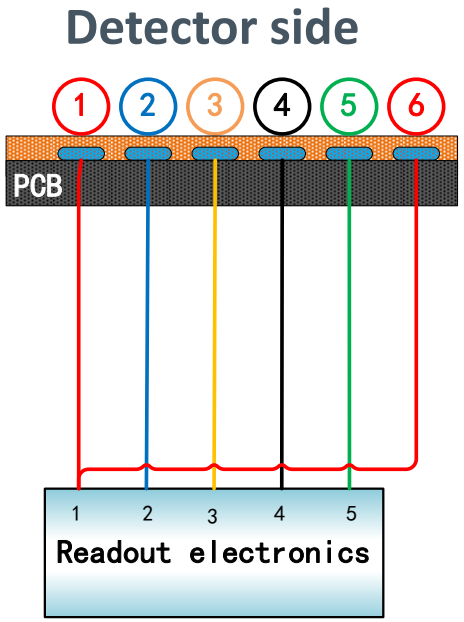


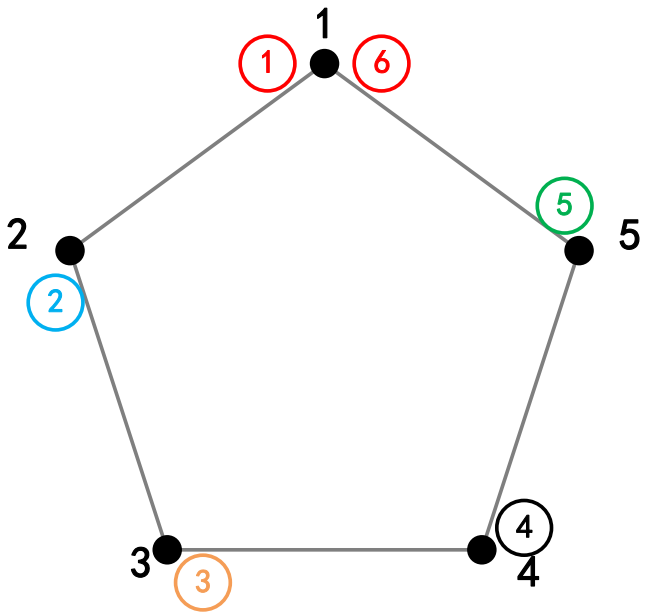


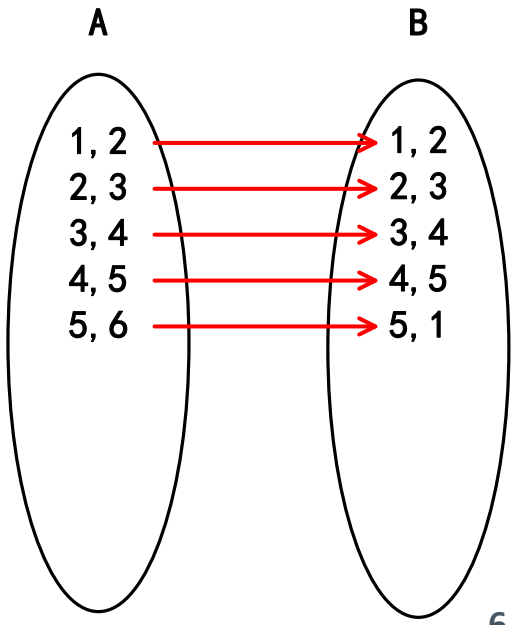


通道编码复用方法的构建

› 编码图理论
  - ①②③④⑤…代表探测器读出单元
  - 1, 2, 3, 4, 5, … 代表电子学读出通道
  - **通道编码复用是将一对连续的探测器通道映射到一对唯一的电子学通道**

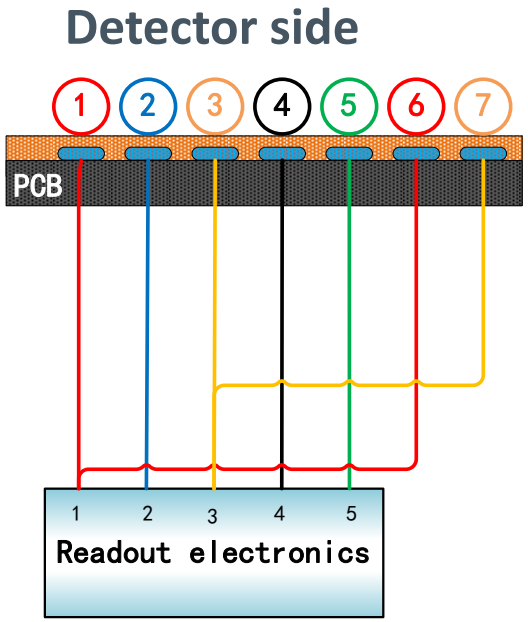


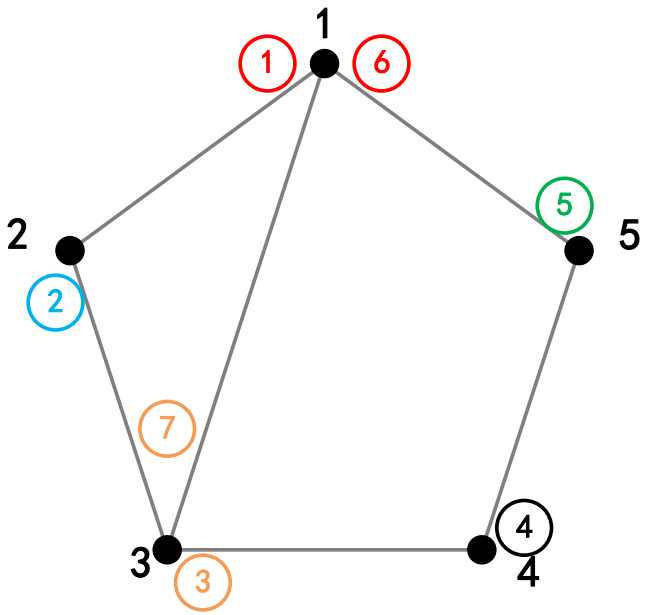


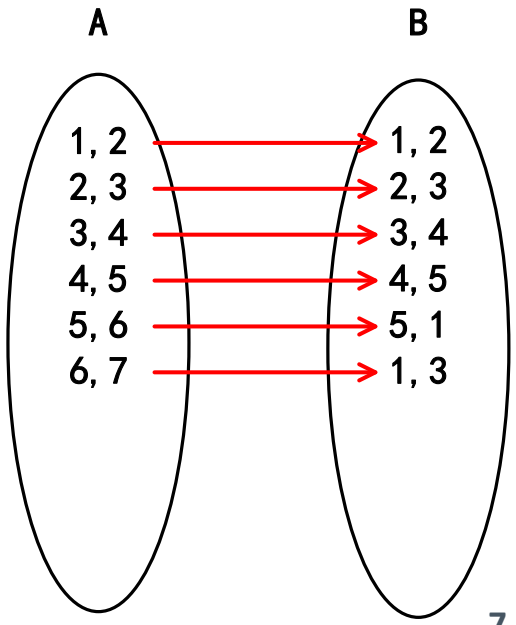


通道编码复用方法的构建

› 编码图理论
  - ①②③④⑤…代表探测器读出单元
  - 1, 2, 3, 4, 5, … 代表电子学读出通道
  - **通道编码复用是将一对连续的探测器通道映射到一对唯一的电子学通道**

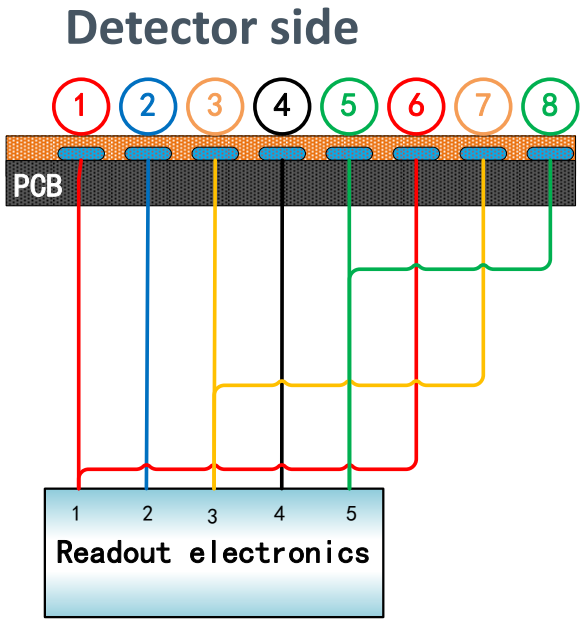


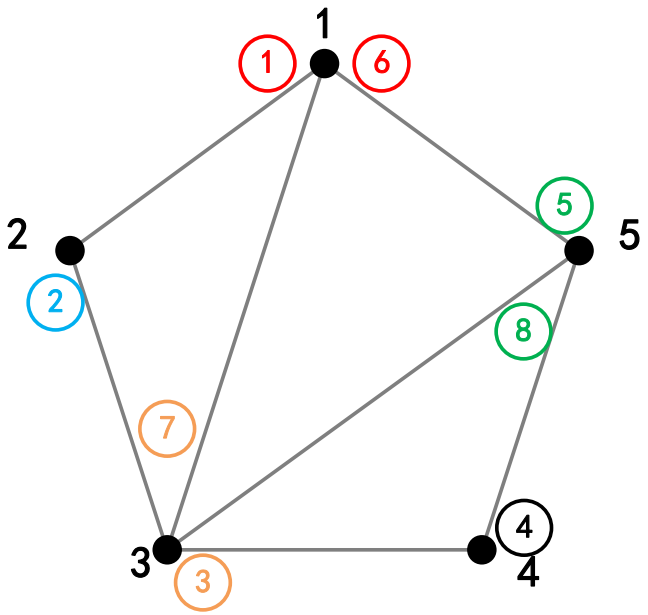


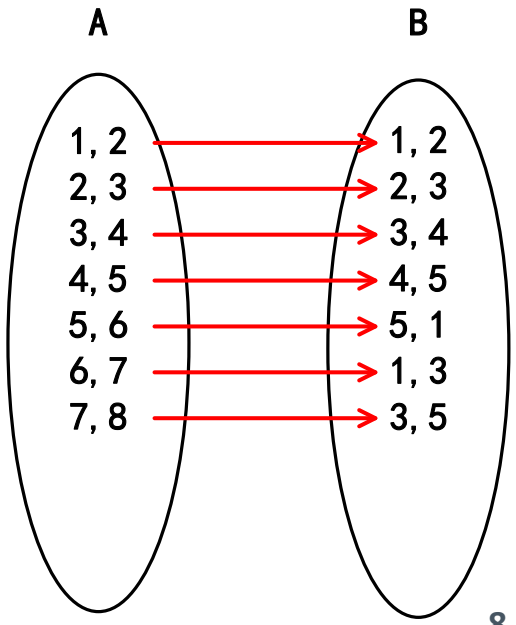


通道编码复用方法的构建

› 编码图理论
  - ①②③④⑤…代表探测器读出单元
  - 1, 2, 3, 4, 5, … 代表电子学读出通道
  - **通道编码复用是将一对连续的探测器通道映射到一对唯一的电子学通道**

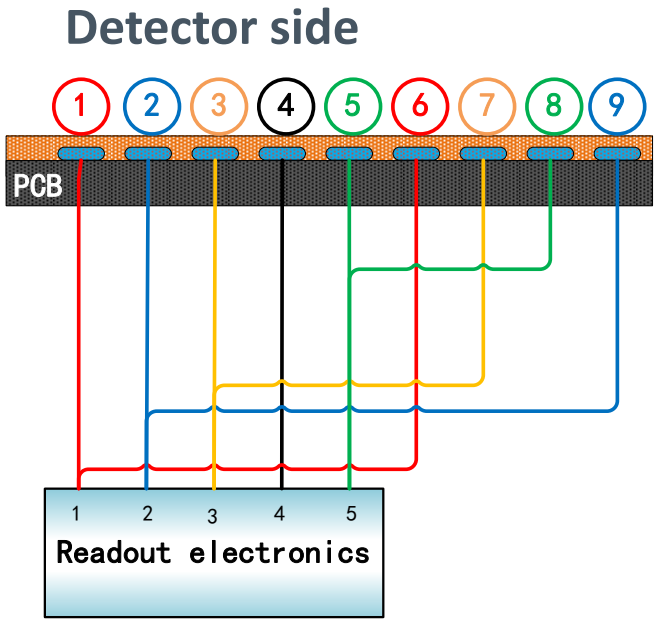


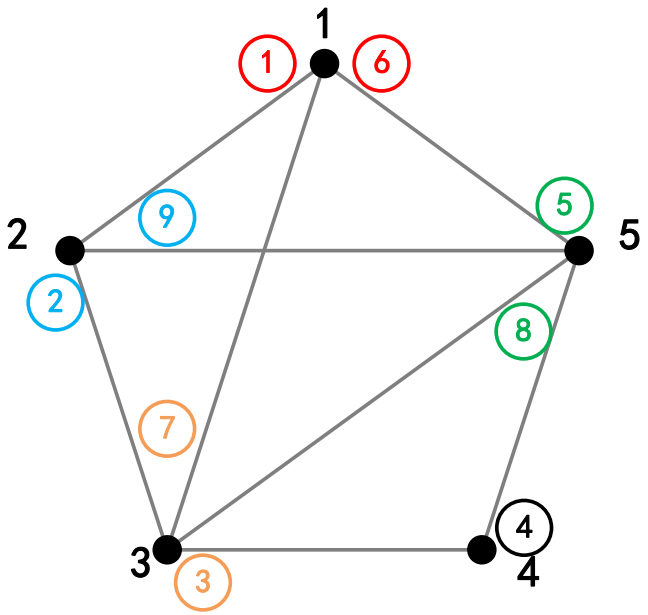


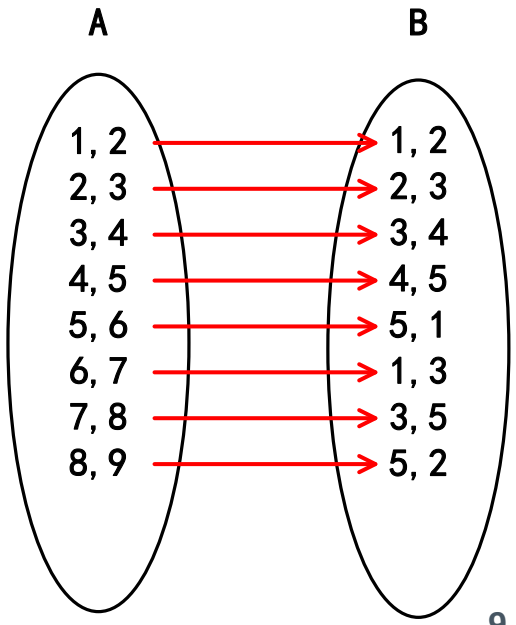


通道编码复用方法的构建

› 编码图理论
  - ①②③④⑤...代表探测器读出单元
  - 1, 2, 3, 4, 5, ... 代表电子学读出通道
  - **通道编码复用是将一对连续的探测器通道映射到一对唯一的电子学通道**

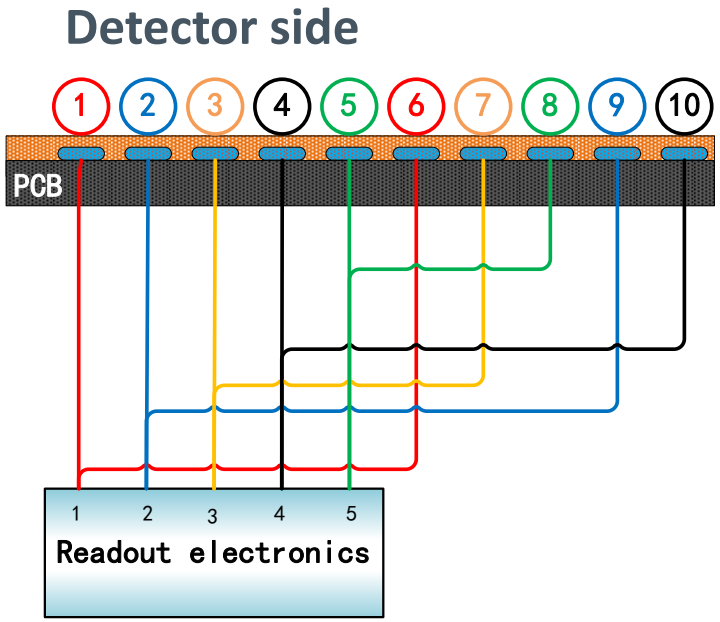


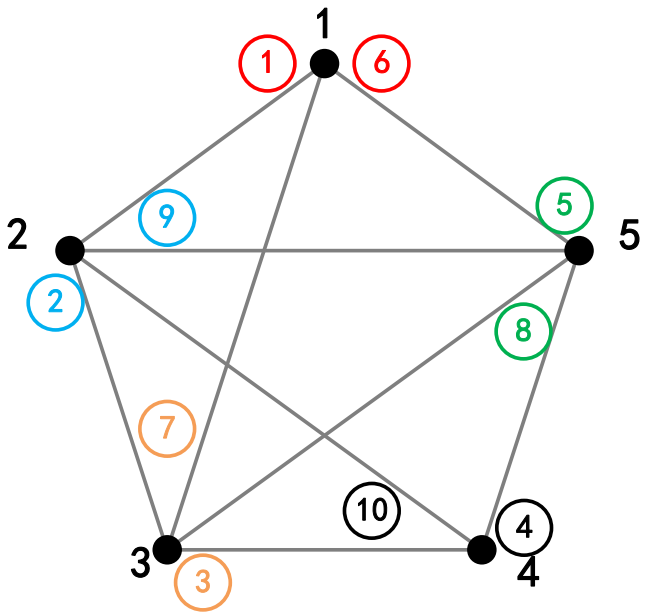


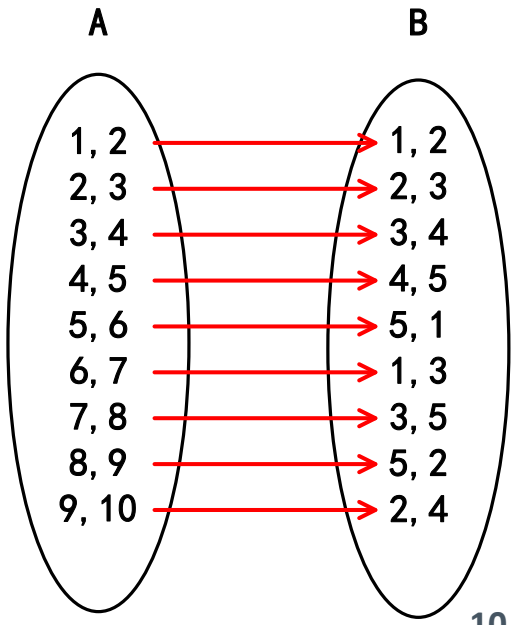


通道编码复用方法的构建

› 编码图理论
  - ①②③④⑤…代表探测器读出单元
  - 1, 2, 3, 4, 5, … 代表电子学读出通道
  - **通道编码复用是将一对连续的探测器通道映射到一对唯一的电子学通道**

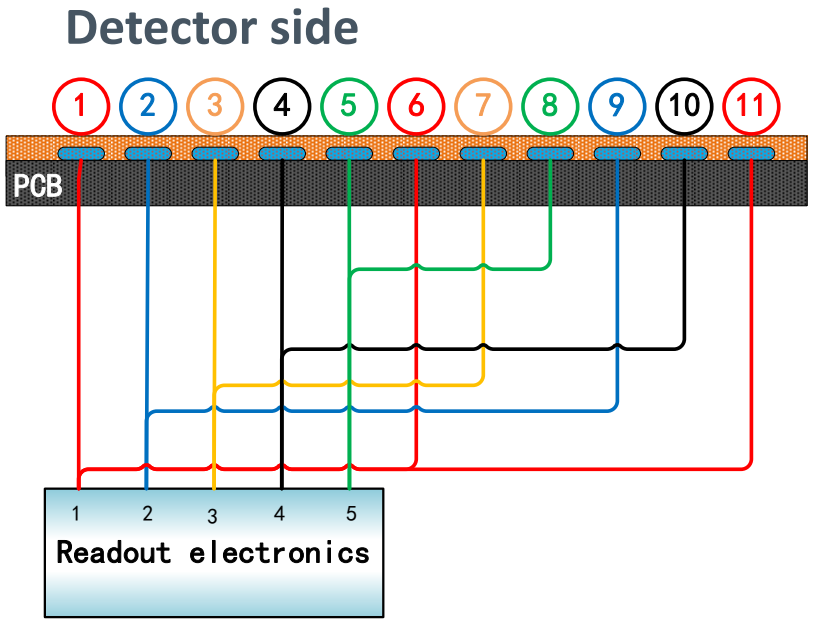


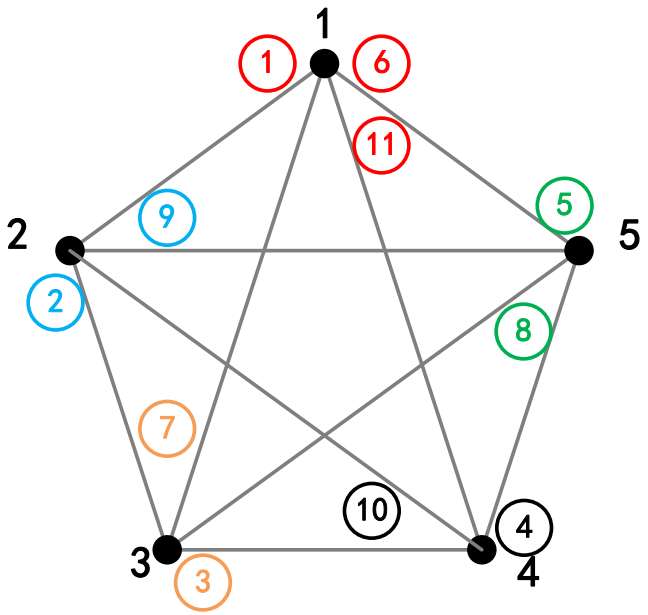


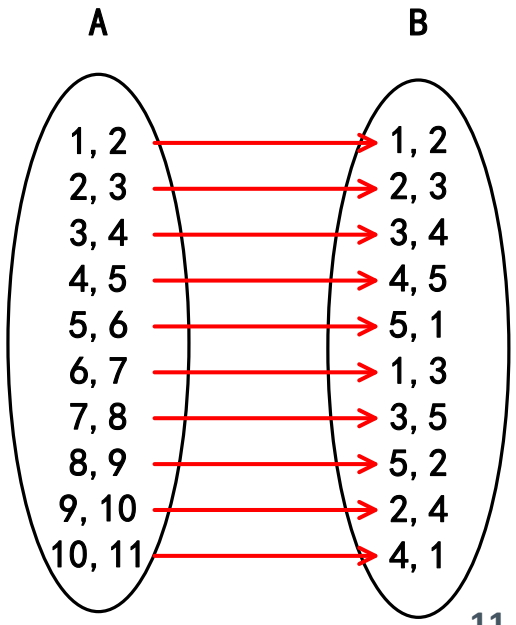


通道编码复用方法的构建

› 编码图理论
  - ①②③④⑤…代表探测器读出单元
  - 1, 2, 3, 4, 5, … 代表电子学读出通道
  - **通道编码复用是将一对连续的探测器通道映射到一对唯一的电子学通道**

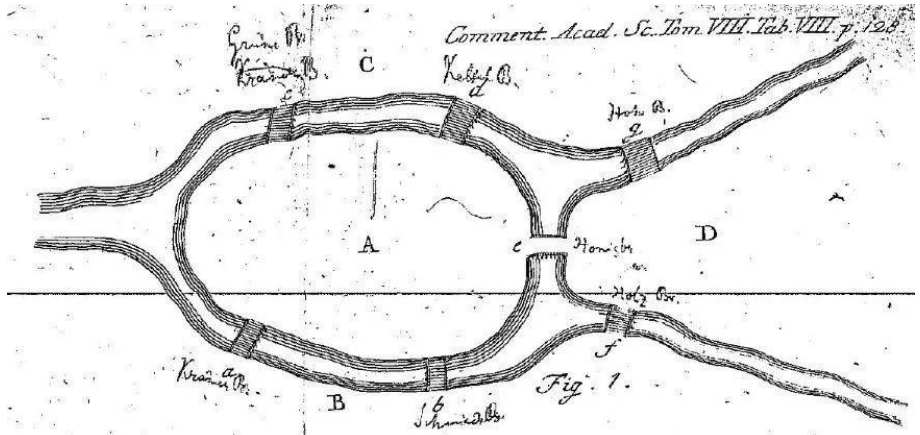




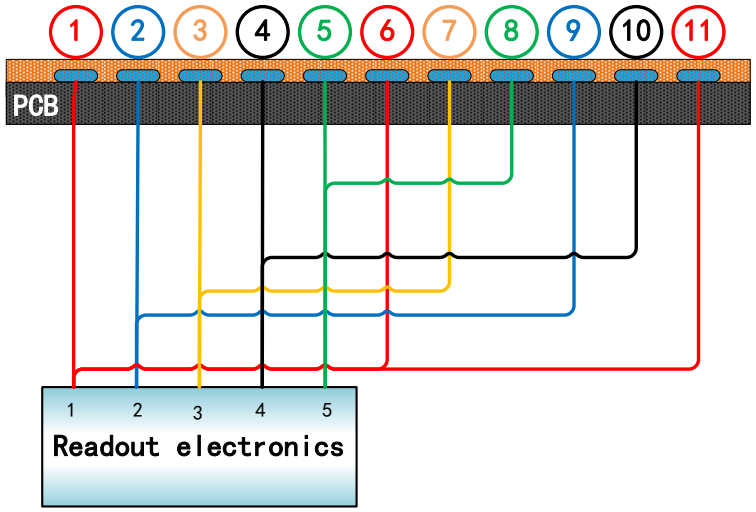


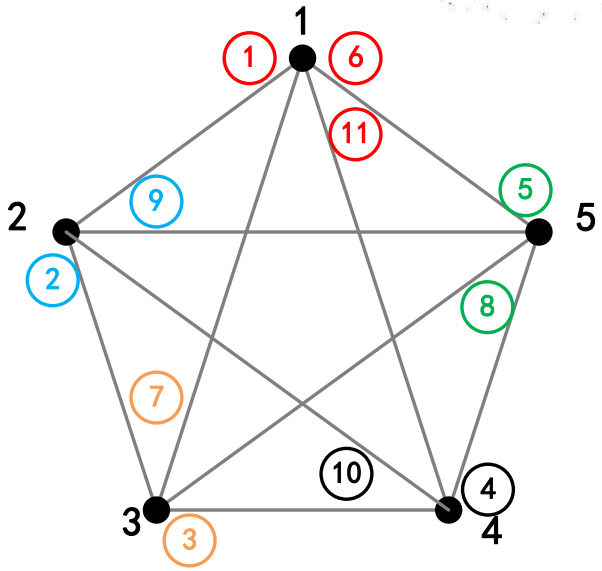
通道编码复用方法的构建

› 编码图代表了一种通道压缩方法
  - 顶点表示电子学通道
  - 边表示一对连续的探测器通道
  - 如果图中含有欧拉回路
    ⇒可以被用于构造编码读出方案



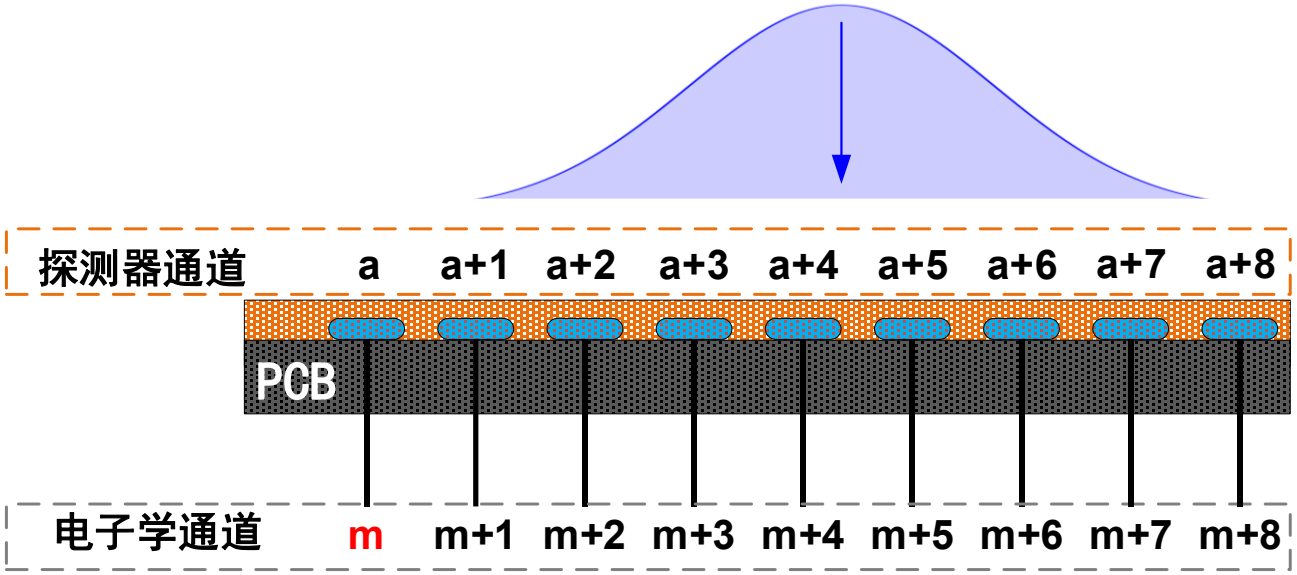
Seven Bridges of Königsberg





通道编码复用方案的构造条件

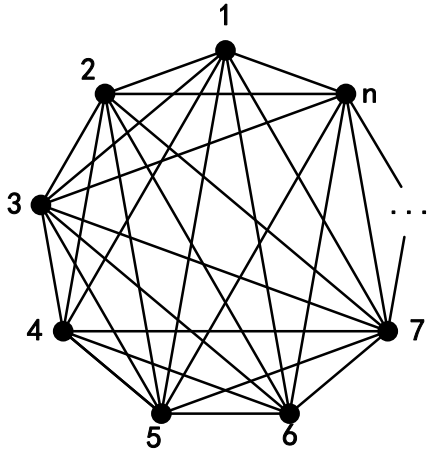
- 应用于微结构气体探测器读出需要考虑如下限制：
  - 在探测器产生电荷扩散范围内，读出电子学通道必须唯一
    - 保证多条着火的击中位置解码准确度



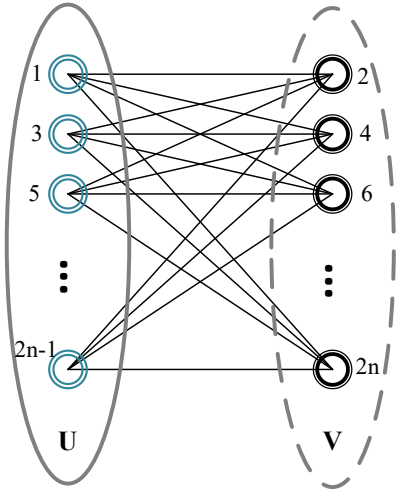
  - 每个电子学通道必须等间隔的被复用
    - 保证不同通道的均匀性

通道编码复用方案的构造

- 基于图论中的哈密顿回路理论*，构造两种不同的编码方案
  - 基于完全图的编码方案
  - 基于二分图的编码方案
- 在任意的(n-4)通道范围内，探测器信号不会由于编码发生混淆
  - N为电子学通道数
  - 最大压缩比为(n-2)/2



完全图编码
优势：能实现最大压缩比



二分图编码
优势：能抑制噪声引起的误击中

*Jimbo Shuji, On the Eulerian recurrent lengths of complete bipartite graphs and complete graphs

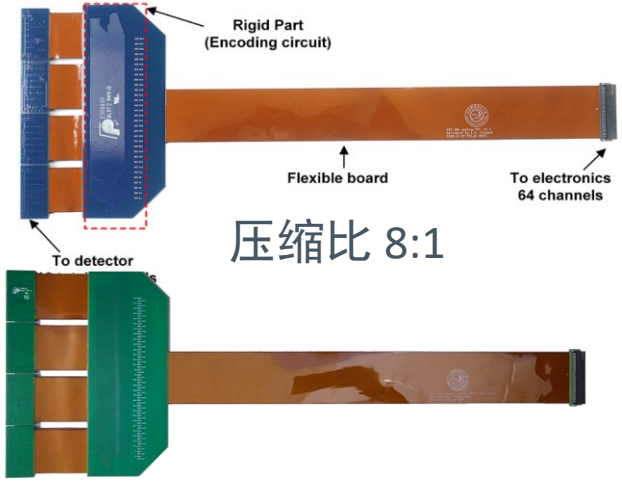
编码读出电路设计

› 基于两种编码图理论设计了不同压缩比率的编码读出电路

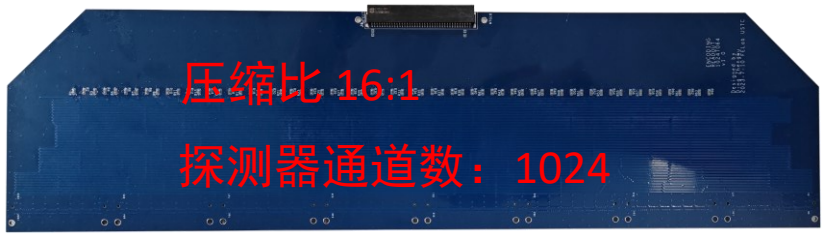
探测器通道数：386

压缩比 6:1

探测器通道数：512

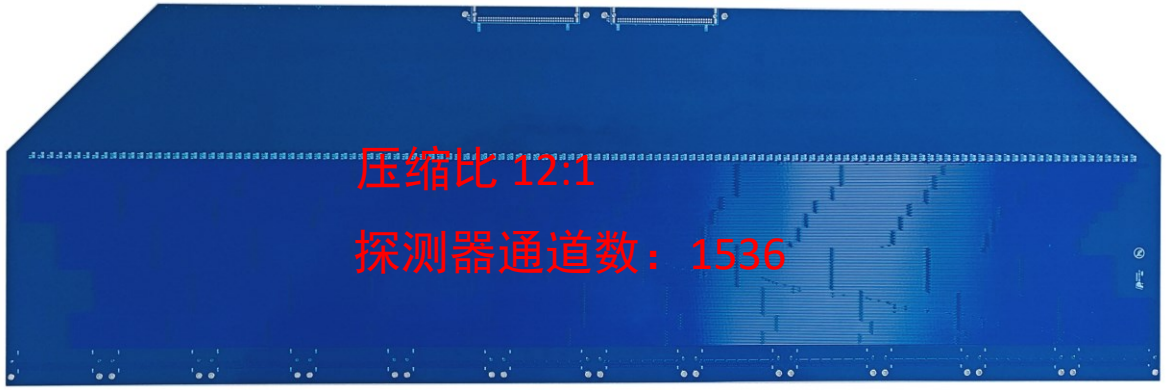


压缩比 8:1



压缩比 16:1

探测器通道数：1024



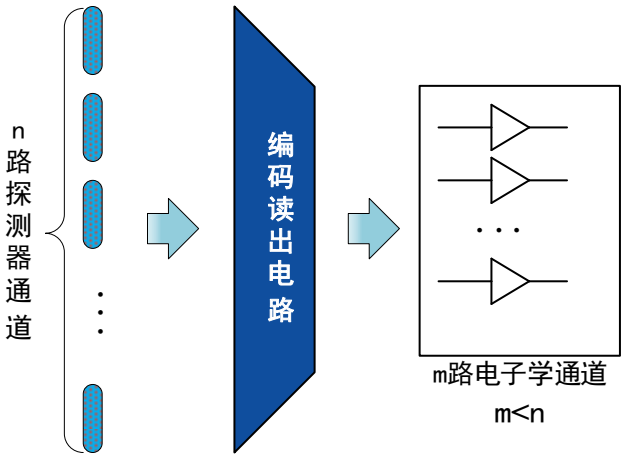
压缩比 12:1

探测器通道数：1536

位置解码算法研究

› 编码的过程利用编码矩阵进行描述

– d_1~d_n表示探测器通道，e_1~e_m为电子学通道



$$\begin{Bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & \cdots & M_{mn} \end{Bmatrix} \times \begin{matrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{matrix} = \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{matrix} \quad (m < n)$$

› 解码过程即求解不定方程：$\mathrm{M} \times \vec{d} = \vec{e}$

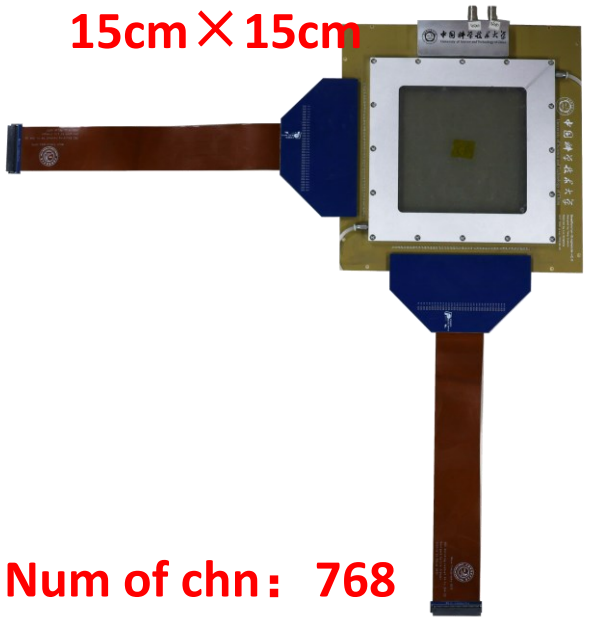
– 利用如下正则化方程实现对击中位置的求解

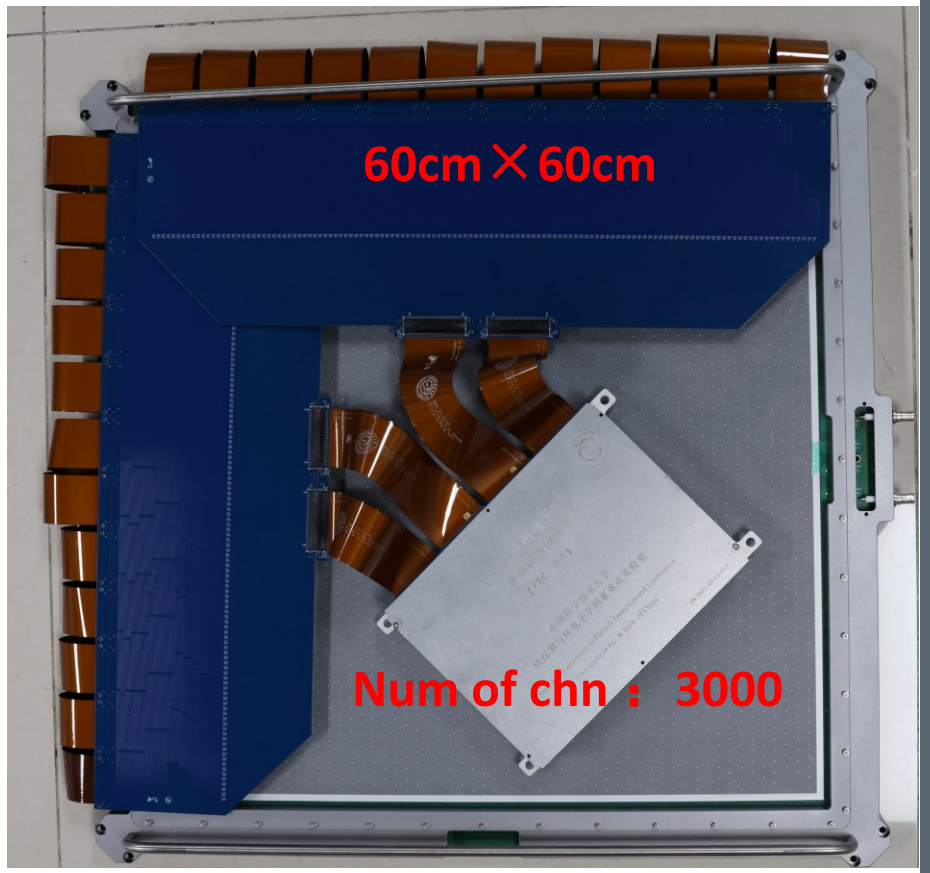
$$\min\{\| M \cdot \vec{d} - \vec{e} \|^2 + \lambda \| L \cdot \vec{d} \|^2\}$$

– 从求解结果中挑选出连续的结果即为探测器着火通道

用于读出Micromegas探测器读出

› 应用于三种不同尺寸的Micromegas探测器读出
  - 384通道编码压缩为64路电子学通道
  - 1024通道编码压缩为64路电子学通道
  - 1536通道编码压缩为128路电子学通道



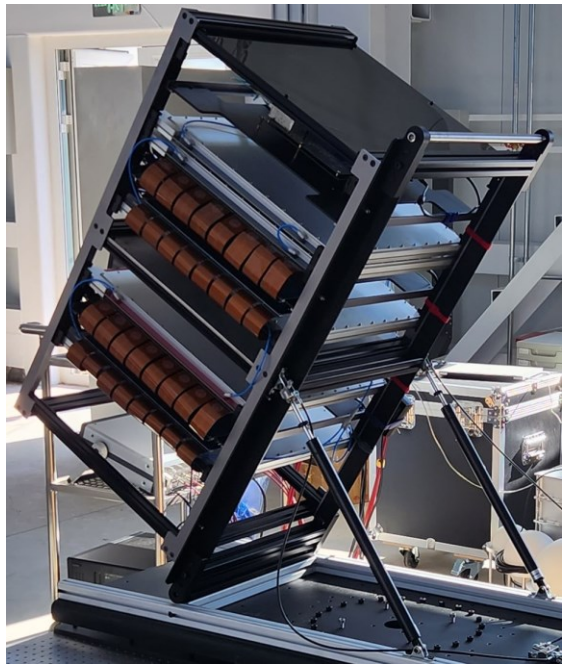


应用于宇宙线缪子径迹测量

› 用于不同面积Micromegas探测器读出

– 利用位置编码方案，可以使得径迹测量系统的电子学通道数和复杂度控制在一个较小的范围

8层Micromegas构成的径迹测量系统*
有效面积：150×150mm^2
探测器通道数：**3072路**
电子学通道数：**1024路**



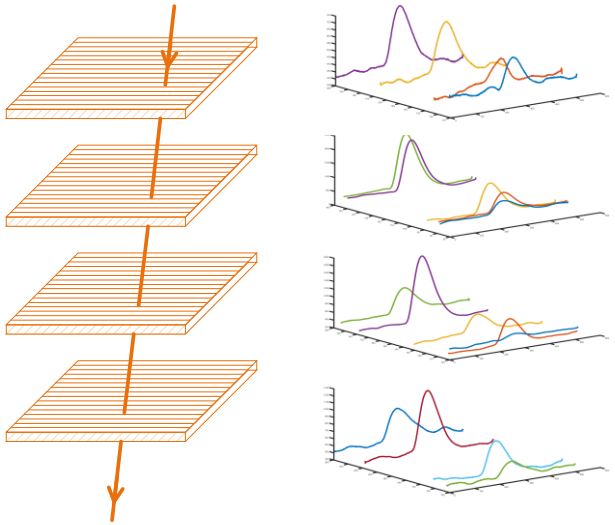
4层Micromegas构成的径迹测量系统
有效面积：400×400mm^2
探测器通道数：**8000路**
电子学通道数：**512路**

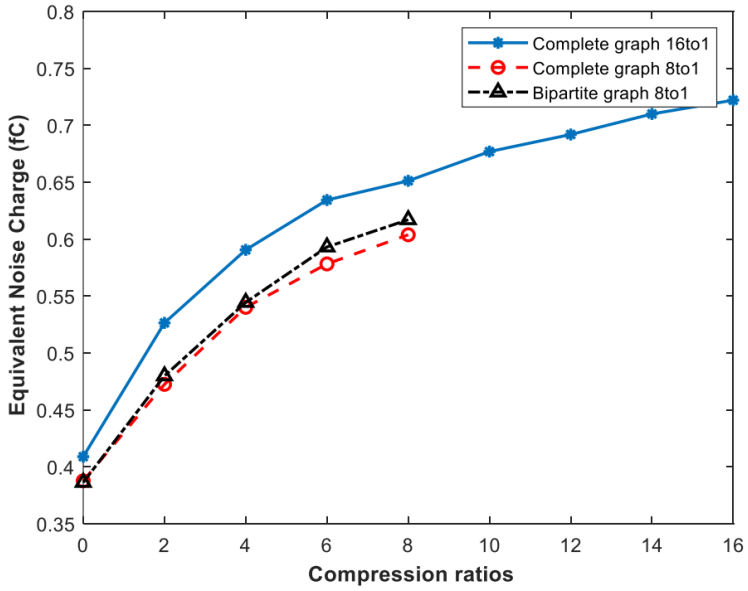
4层Micromegas构成的径迹测量系统
有效面积：600×600mm^2
探测器通道数：**12000路**
电子学通道数：**1024路**

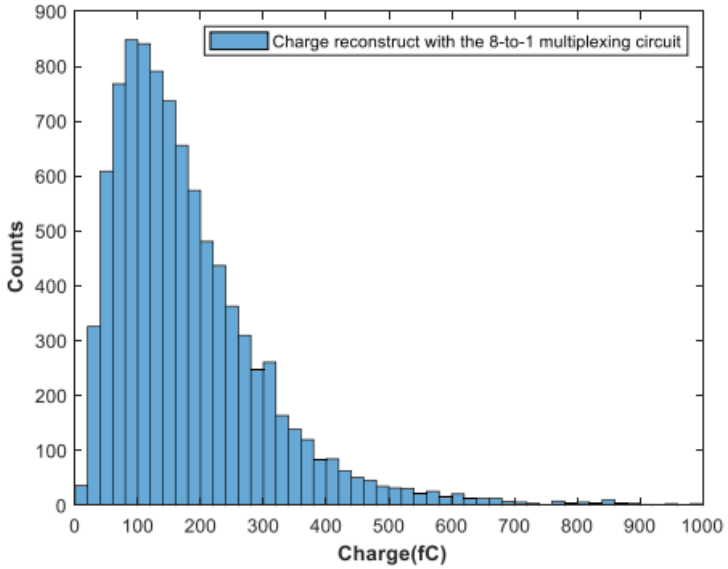
*径迹测量系统及Micromegas探测器测试见：刘昱林：《大面积Micromegas径迹探测器研制与宇宙线测试》

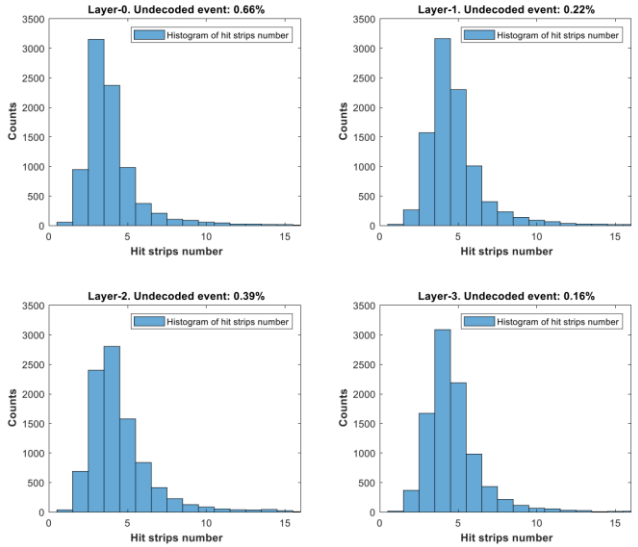
噪声和位置解码能力

- 对前端电子学噪声的影响
  - 增加等效输入电容
  - 噪声有一定增加，但不影响读出
- 击中位置重建能力
  - 能正确重建击中位置
  - 未能解码事例<1%



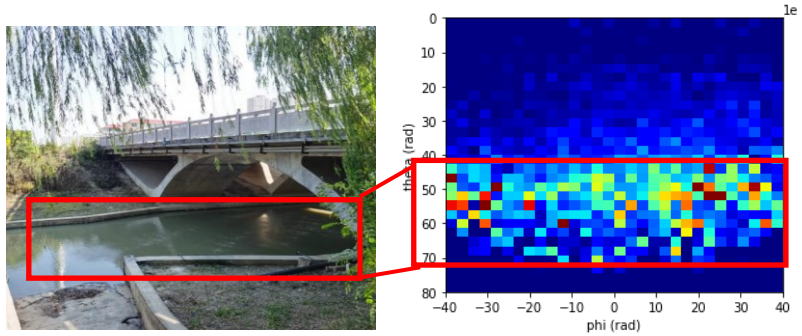




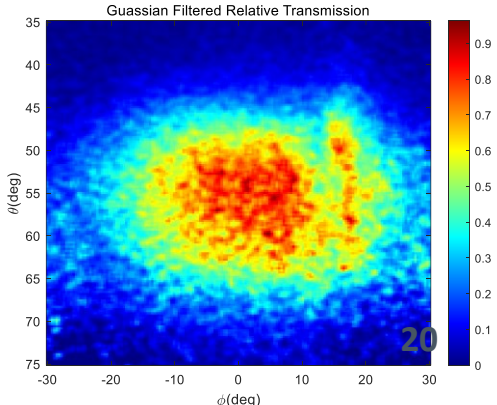


用于用宇宙线缪子成像

- 用于基于Micromegas探测器的缪子成像装置读出通道压缩
  - 正确重建缪子击中位置
  - 正确重建缪子径迹



- 成功开展多次成像实验
  - 地铁隧道内成像
    - 探测到地表河流位置
  - 合肥大蜀山成像
    - 重建出山体不同区域密度
  - 炼钢厂高炉成像



总结与展望

- 总结
  - 本研究开发了两种不同的编码复用读出方案，可用于大面积微结构气体探测器信号引出
  - 针对不同尺寸和通道数的探测设计了不同的编码读出电路，并成功用于宇宙线缪子径迹测量和成像
- 展望
  - 针对多个粒子击中情况进行解码算法研究
  - 改进读出方式，解决探测器单通道情况无法解码的难题
  - 开展更高压缩比编码读出电路设计

谢谢

感谢向本项目提供资助和支持的国家自然科学基金
《**微结构气体探测器通道编码复用方法研究**（No. 12205297）》
《**核电子学方法研究及应用**（No. 12025504）》
感谢为本项目测试提供支持的安徽省地震台、安阳钢铁集团有限责任公司