

Real-Time Communications Infrastructures for Cyber-Physical Systems

计算机-物理系统一体化的实时通信底层

Qixin Wang

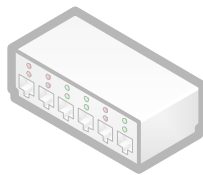
王启新

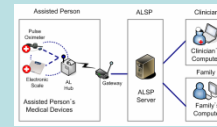
Dept. of Computing

The Hong Kong Polytechnic Univ.

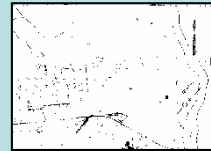
香港理工大学电子计算学系

23/6/2009





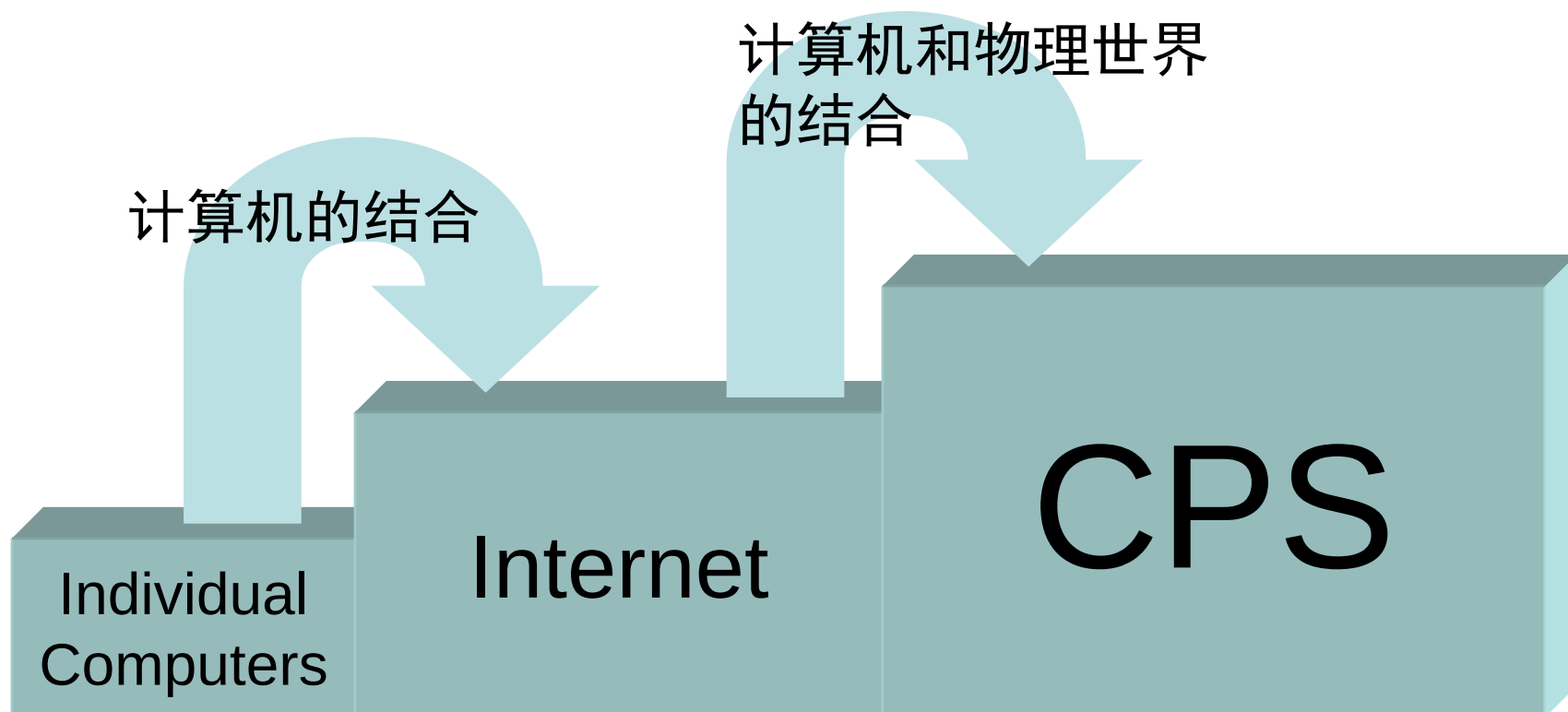
Cyber-Physical Systems 计算机-物理系统一体化

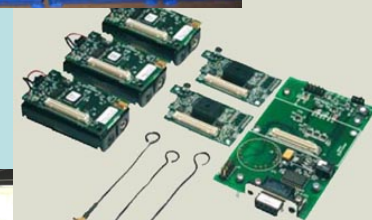




计算机-物理系统一体化(Cyber-Physical Systems, CPS) 是计算机科学发展的一个主题

下一步的普适计算





CPS





医疗设备即插即用（MDPnP）集成上万种用于医院和辅助生活的医疗设备

在手术麻醉中用于连接电子医疗记录仪（anesthesia EMR）的各种导线





手术室自动化

错综复杂的导线造成隐患



↑
目标

← 现状

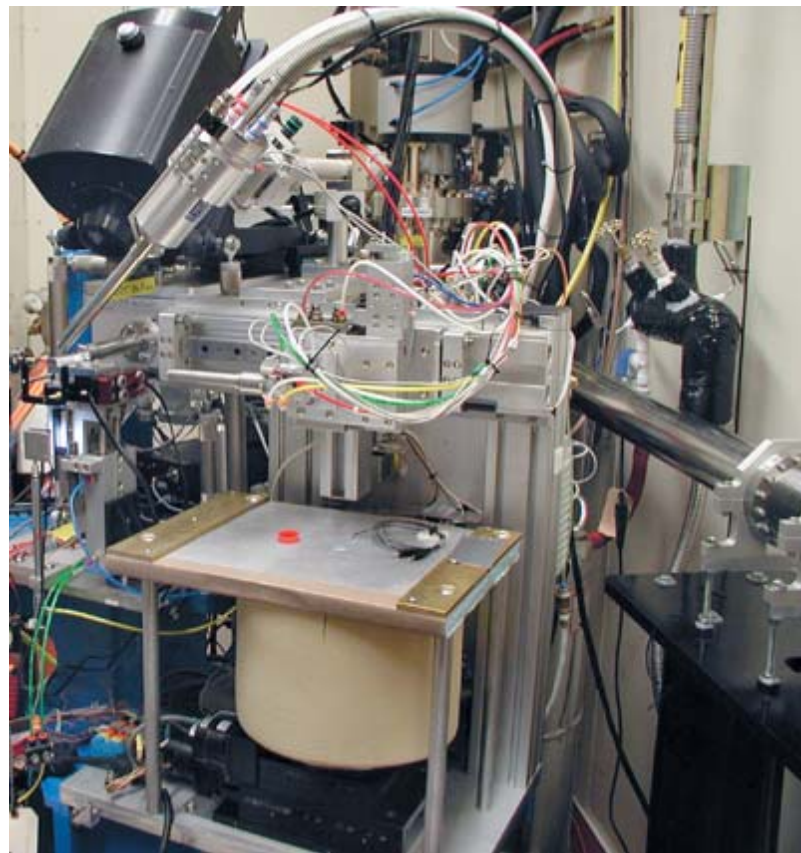


下一代的工业自动控制

更大量的嵌入式计算机

更复杂的分布式系统

有线 → 有线 + 无线





下一代的飞行器

协和式飞机

1976





下一代的飞行器

空客A380

2007





远程实感（Telepresence）遏制城市恶性膨胀





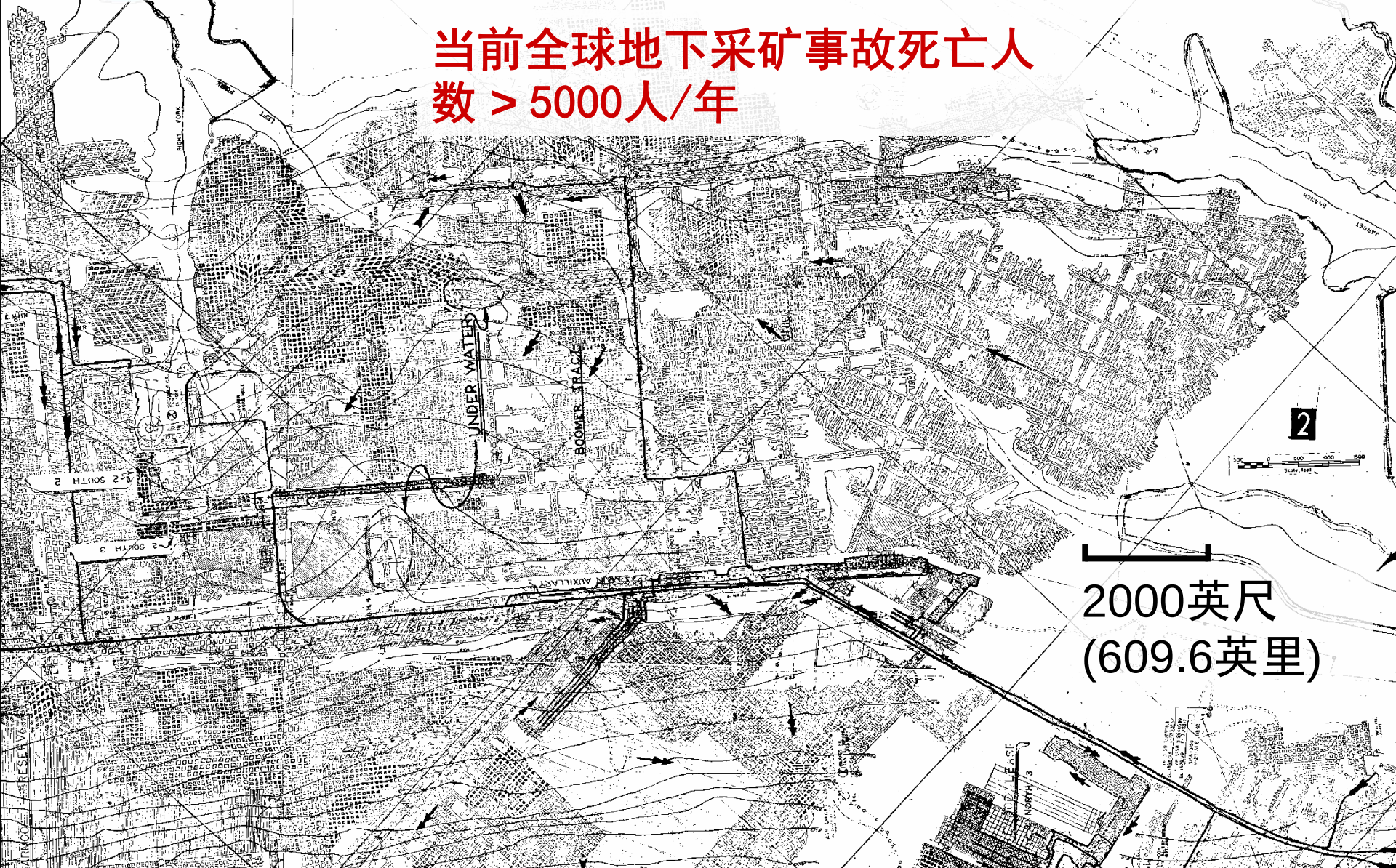
远程医疗、远程手术拯救更多生命





通过远程实感机器人进行地下采矿，避免人员伤亡

当前全球地下采矿事故死亡人数 > 5000人/年

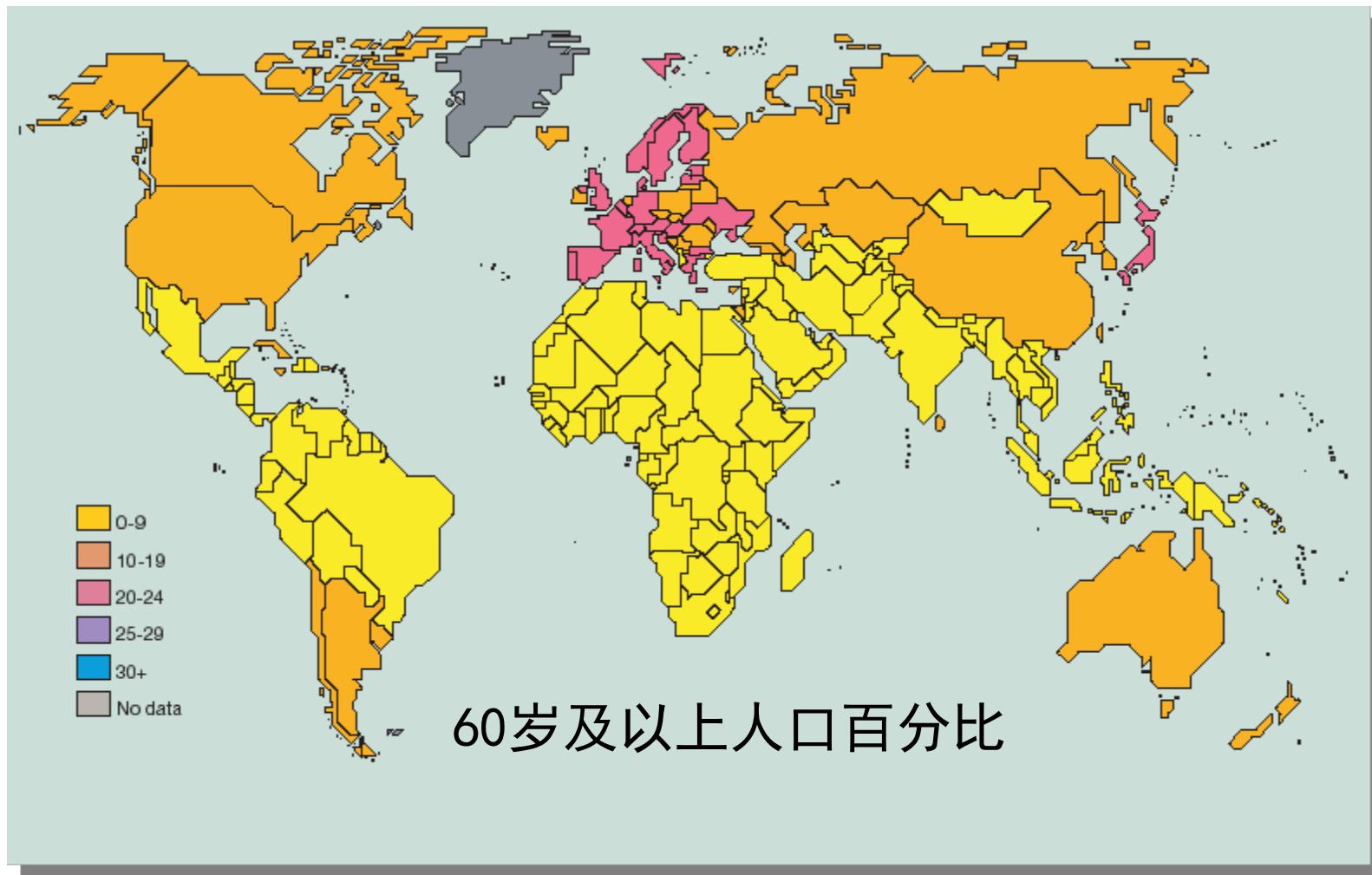


2000英尺
(609.6英里)



辅助生活（Assisted Living）缓解老龄化危机

2002



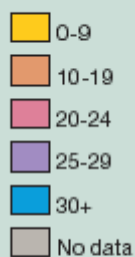
来源：联合国 ▪ “人口老龄化 ▪ 2002”



辅助生活（Assisted Living）缓解老龄化危机

2050

15.9%
GDP,
2010

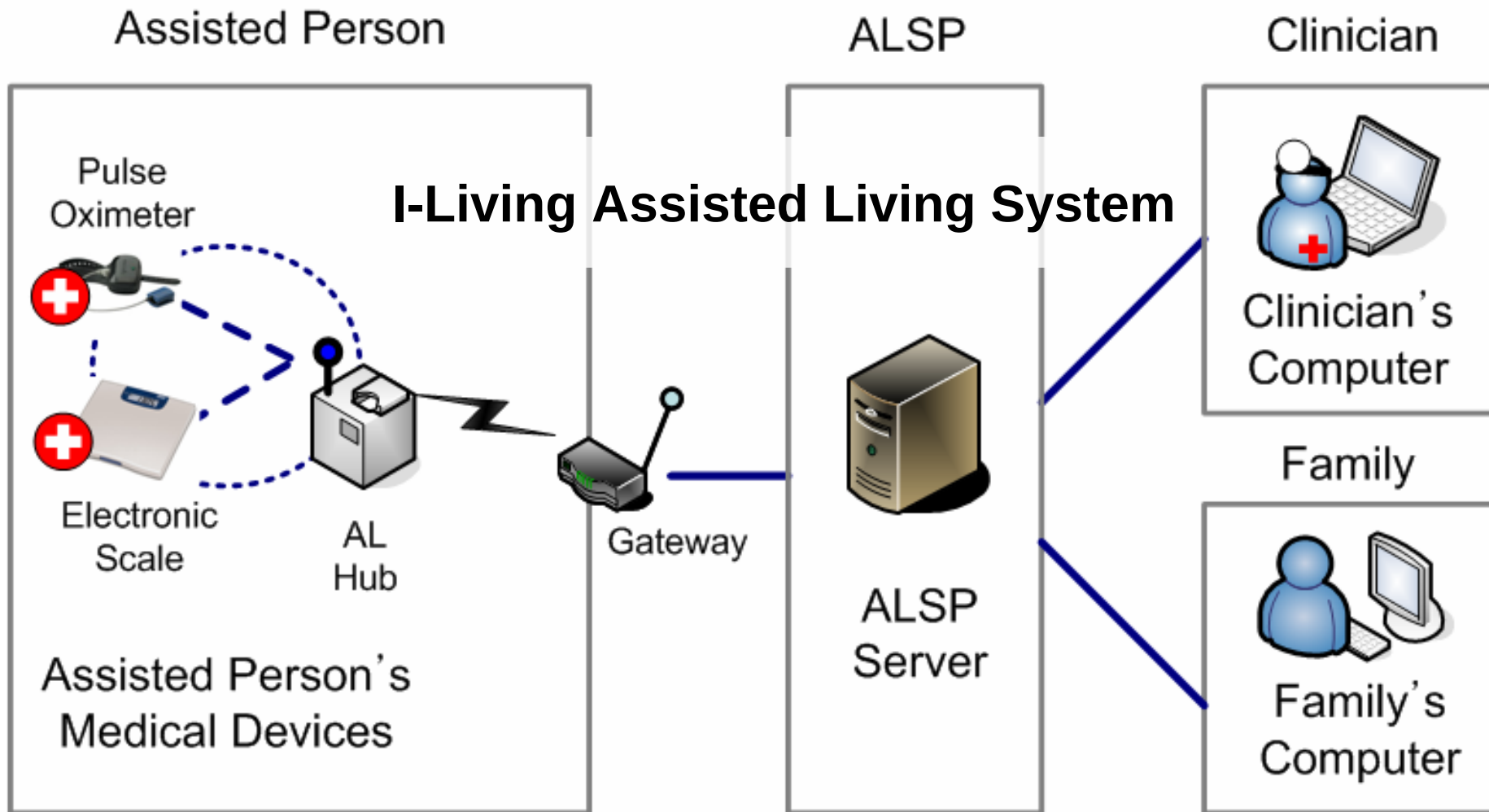


60岁及以上人口百分比

来源：联合国 ▪ “人口老龄化 ▪ 2002”

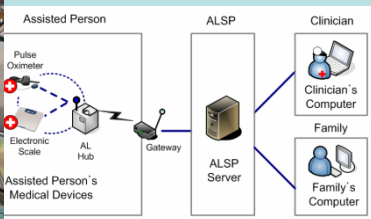


辅助生活（Assisted Living）缓解老龄化危机

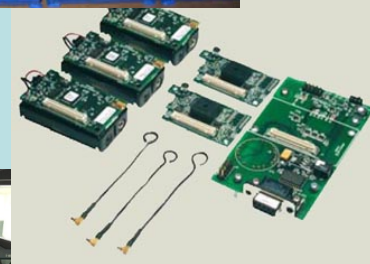
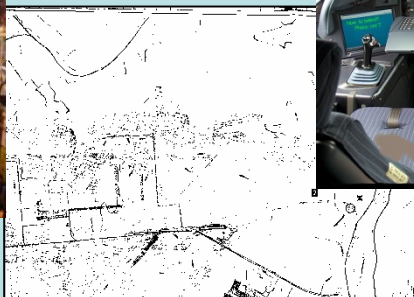


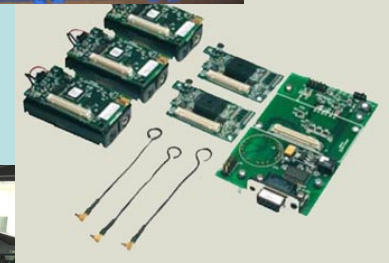
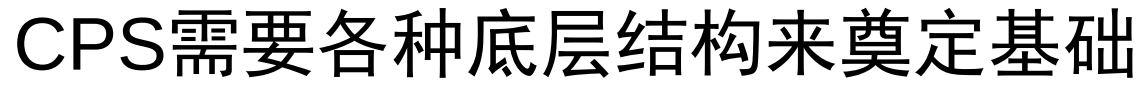


CPS的应用不止于此



CPS





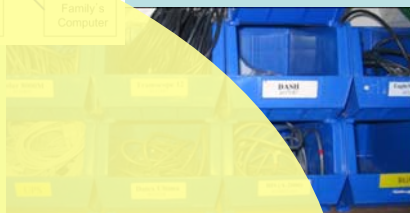
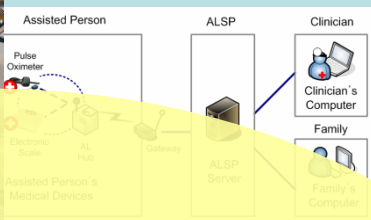
CPS





其中重要的一环是其实时底层结构

实时 (Real-Time, RT)





手术机器人：每项任务都是连续的传感/传动操作

每个操作：

1. 必须按时完成
2. 不必快速完成





航空和工业控制：每项任务都是连续的传感/传动操作

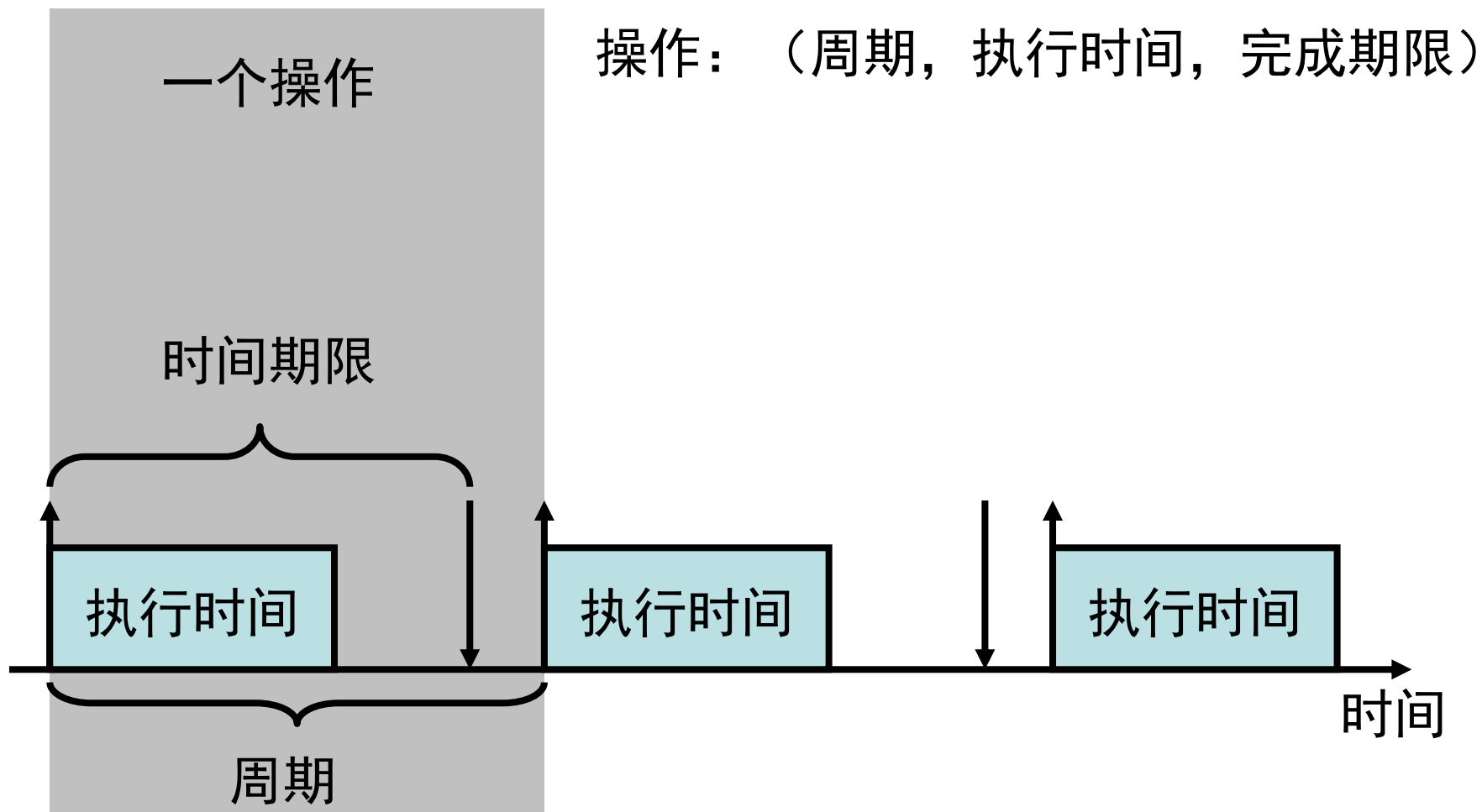
每个操作：

1. 必须按时完成
2. 不必快速完成



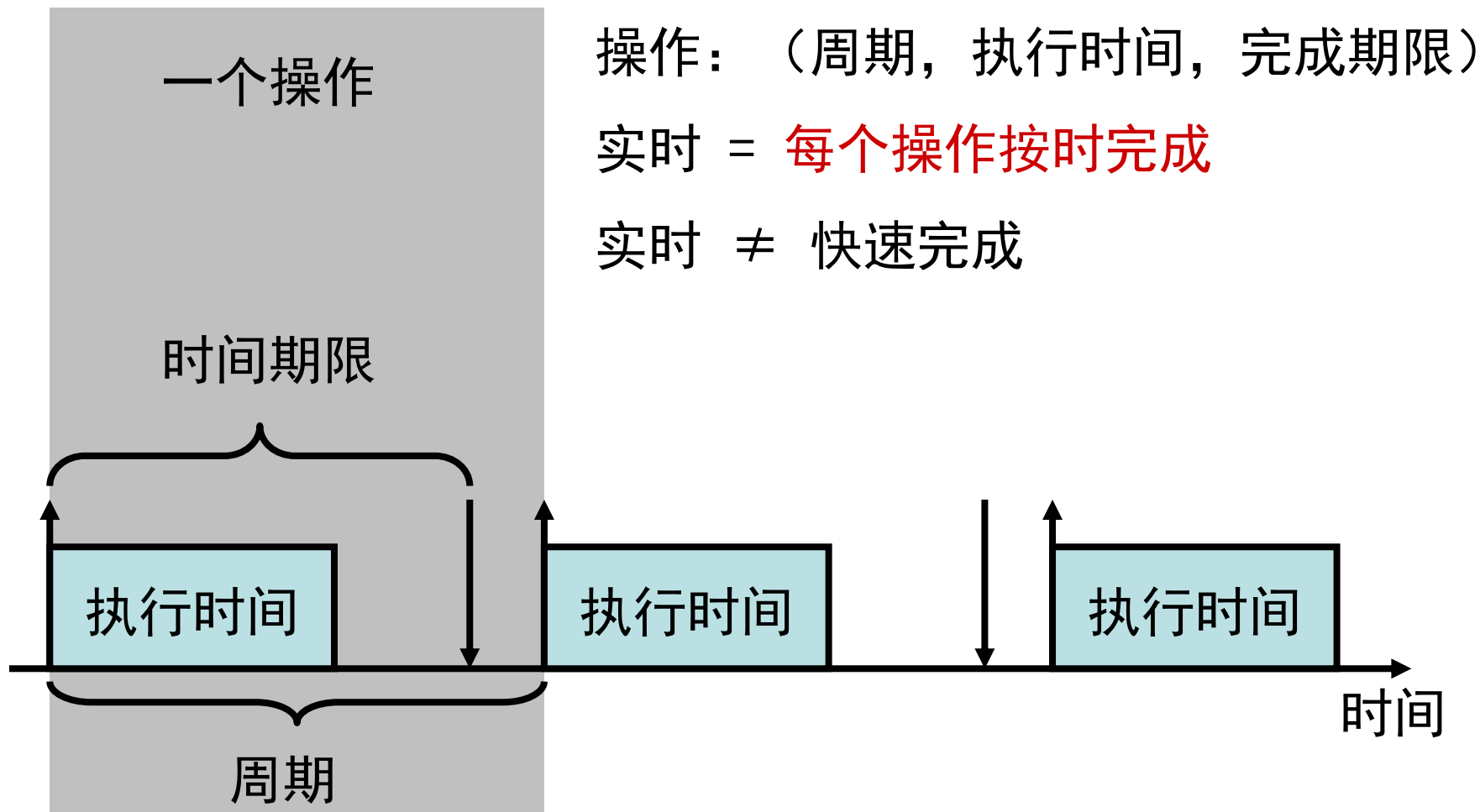


实时任务一般是连续不断的周期操作



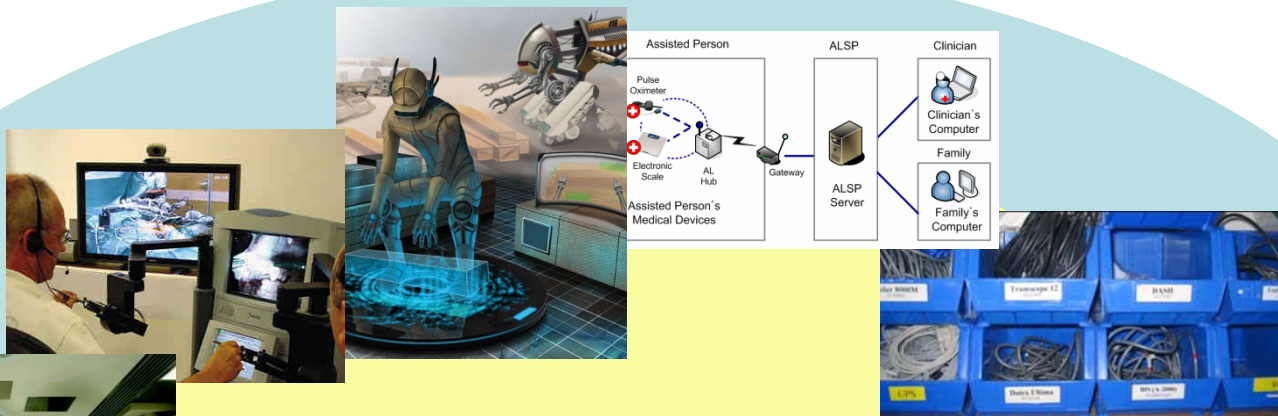


实时任务一般是连续不断的周期操作

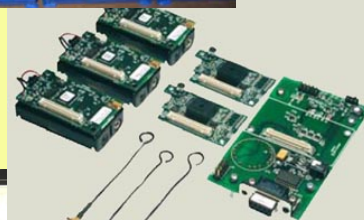




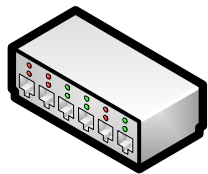
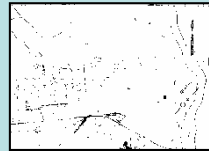
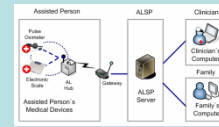
CPS 需要实时通讯底层



实时 (RT)

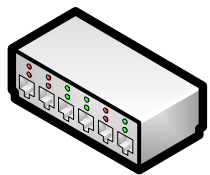
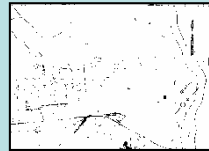
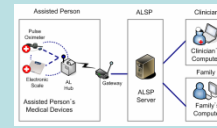


CPS



**Real-Time
Switch
实时交换器**

CPS

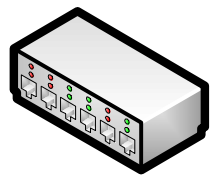
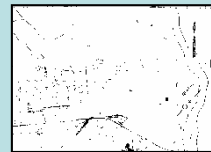
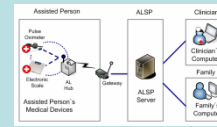


Real-Time
Switch



**Real-Time
Wireless LAN**
实时无线局域网

CPS



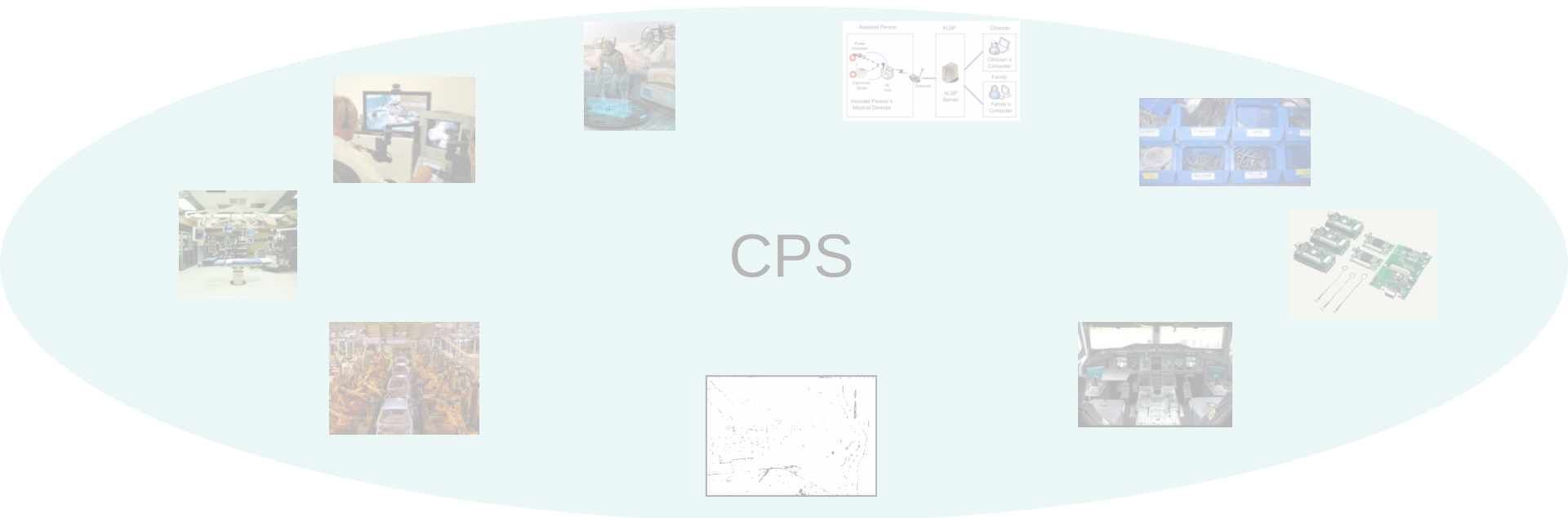
Real-Time
Switch



Real-Time
Wireless LAN



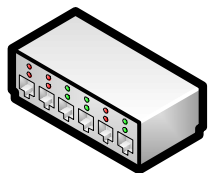
Real-Time
Localization



CPS



Middleware



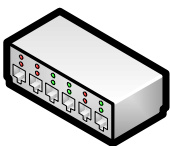
**Real-Time
Switch**
实时交换器



Real-Time
Wireless LAN



Real-Time
Localization

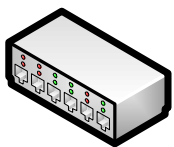


实时交换器实时有线网络的重要基础元件

实时广域网，因特网实时子网

实时工业总线（ Fieldbus ）

实时高性能计算机体系机构，例如
InfiniBand

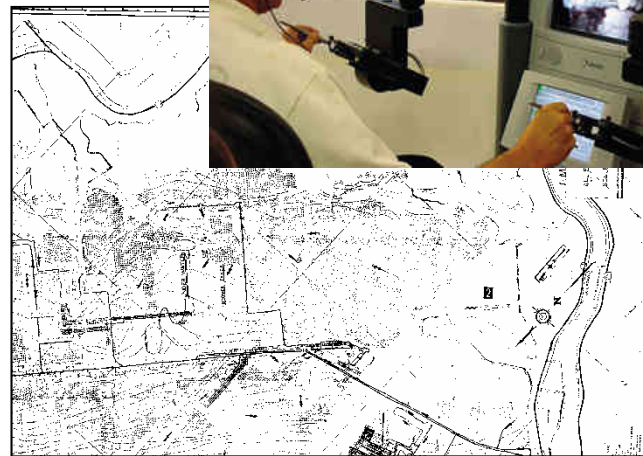


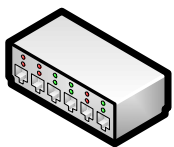
实时交换器实时有线网络的重要基础元件

实时广域网，因特网实时子网

实时工业总线（ Fieldbus ）

实时高性能计算机体系机构，例如
InfiniBand



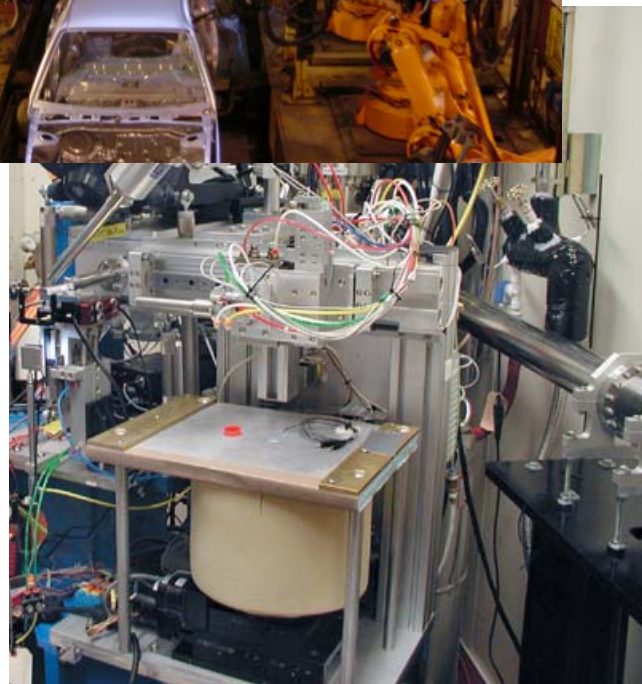


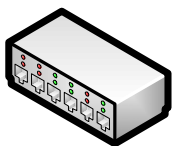
实时交换器实时有线网络的重要基础元件

实时广域网，因特网实时子网

实时工业总线（Fieldbus）

实时高性能计算机体系机构，例如 InfiniBand





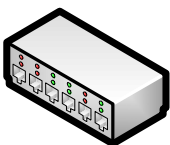
实时交换器实时有线网络的重要基础元件

实时广域网，因特网实时子网

实时工业总线（Fieldbus）

实时高性能计算机体系机构，例如 InfiniBand

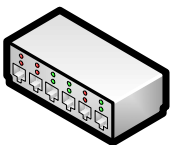




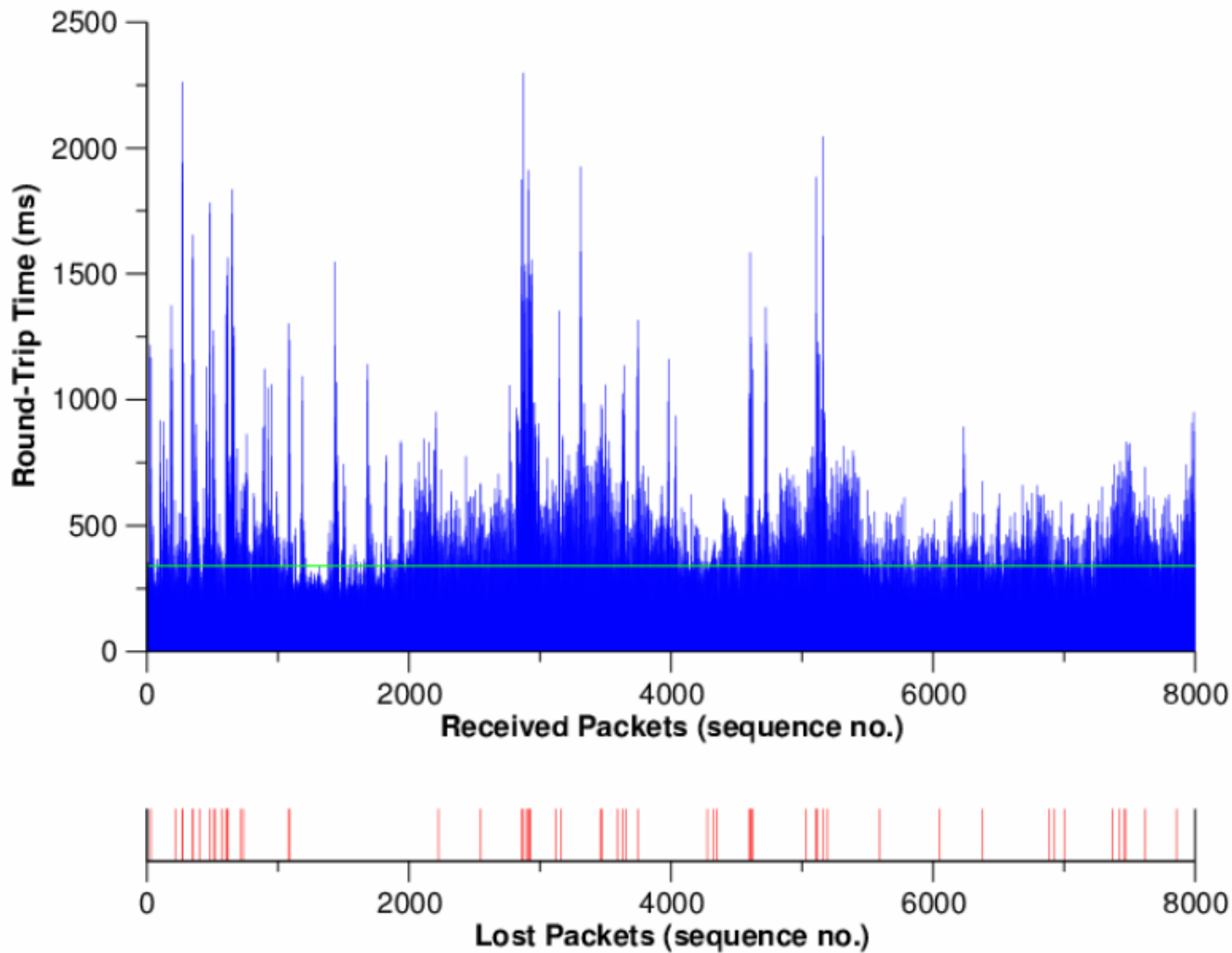
实时交换器的诞生经历曲折

1. A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, "Analysis and simulation of a fair queueing algorithm," in SIGCOMM'89, 1989. pp. 1-12.
2. D. Ferrari, and D. Verma, "A scheme for real-time channel establishment in wide-area networks," in IEEE JSAC, v8, n3, April, 1990
3. D. C. Verma, H. Zhang, and D. Ferrari, "Delay jitter control for real-time communication in packet switching network," in Proceedings of Tricomm'91, pp. 35-46, April 1991.
4. S. Golestani, "A framing strategy for congestion management," in IEEE JSAC, v9, n7, pp. 1064-1077, Sep., 1991
5. L. Zhang, "VirtualClock: a new traffic control algorithm for packet-switched networks," ACM Trans. on Computer Systems, Vol. 9, No. 2, May 1991
6. A. K. Parekh, R. G. Gallager, "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Single-Node Case," in IEEE/ACM ToN, v1, n3, June, 1993.
7. A. K. Parekh, R. G. Gallager, "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Multiple Node Case," in IEEE/ACM ToN, v2, n2, April, 1994.
8. S. Jamaloddin Golestani, "A self-clocked fair queueing scheme for broadband applications," Proc. IEEE INFOCOM'94, pages 636--646, IEEE, 1994.
9. H. Zhang, "Service Disciplines For Guaranteed Performance Service in Packet-Switching Networks," Proceedings of the IEEE, 83(10), Oct 1995
10. Jon C. R. Bennett and H. Zhang, "WF2Q: worst-case fair weighted fair queueing," IEEE INFOCOM'96, March, 1996
11. Pawan Goyal, Harrick M. Vin, and Haichen Cheng, "Start-time fair queueing: a scheduling algorithm for integrated services packet switching networks," ACM SIGCOMM'96, pages 157--168, ACM press, August, 1996
12. I. R. Philp, "Scheduling real-time messages in packet-switched networks," Ph.D. Thesis, Technical Report No. UIUCDCS-R-96-1977, CS Dept., UIUC, Oct., 1996.
13. Subhash Suri, George Varghese, and Girish Chandranmenon, "Leap forward virtual clock: A new fair queueing scheme with guaranteed delays and throughput fairness," IEEE Proc. INFOCOM'97, 1997
14. I. Stoica, S. Shenker, and H. Zhang, "Core-stateless fair queueing: achieving approximation fair bandwidth allocations in high speed networks," Proc. of ACM SIGCOMM'98, October 1998, pp. 118-130.
15. C. R. Kalmanek, H. Kanakia, and S. Keshav, "Rate controlled servers for very high speed networks," in IEEE Global Telecommunications Conference, Dec., 1999.
16. W. Sun, and K. G. Shin, "End-to-end delay bounds for traffic aggregates under guaranteed-rate scheduling algorithms," in IEEE ToN, 13(5): 1188-1201, Oct., 2005.

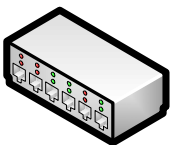
自1989年以来一个长期的课题



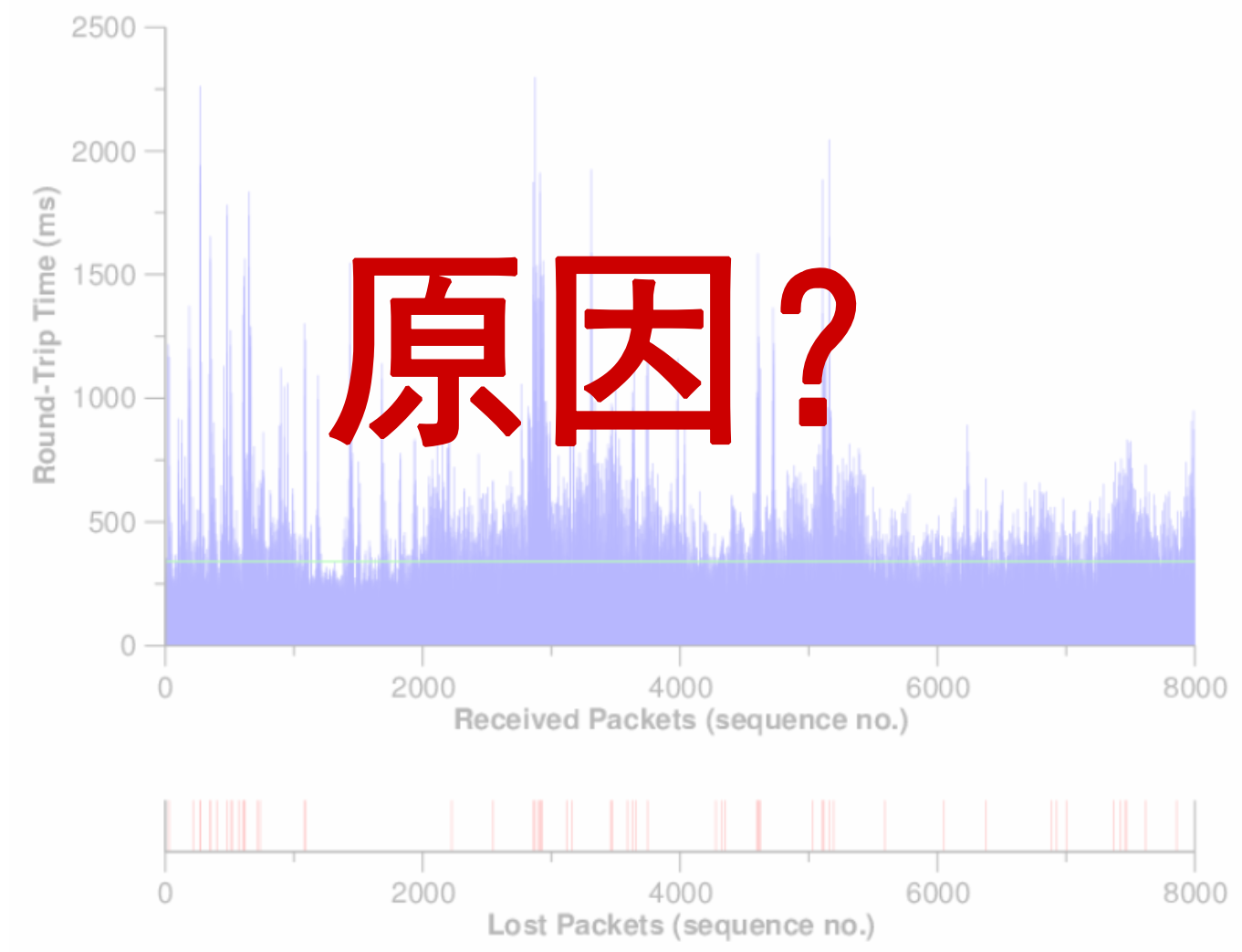
今天的因特网仍非实时



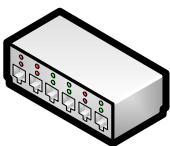
英国与西班牙之间因特网实测结果 [Marsh06]



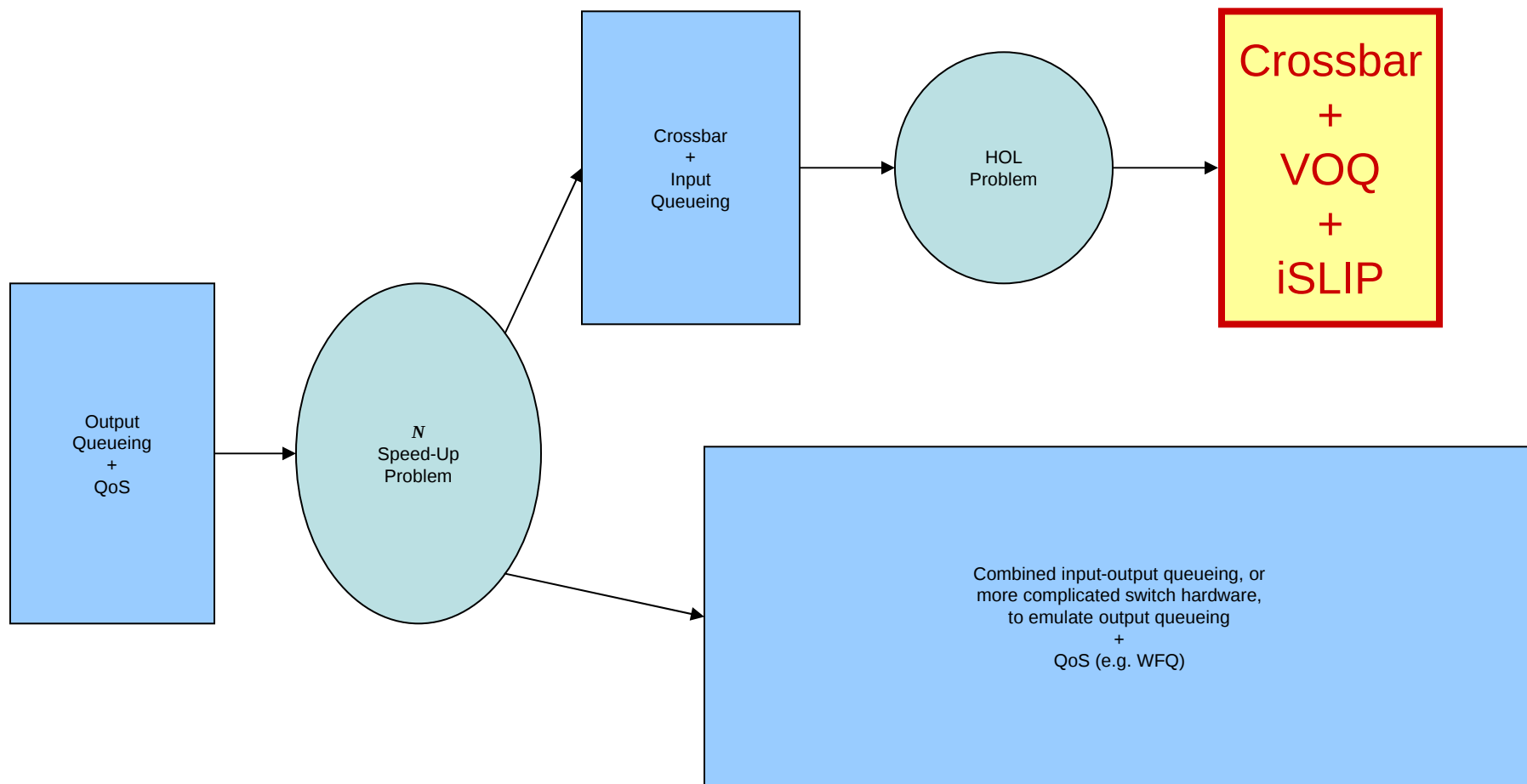
今天的因特网仍非实时

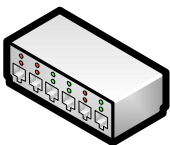


英国与西班牙之间因特网实测结果 [Marsh06]

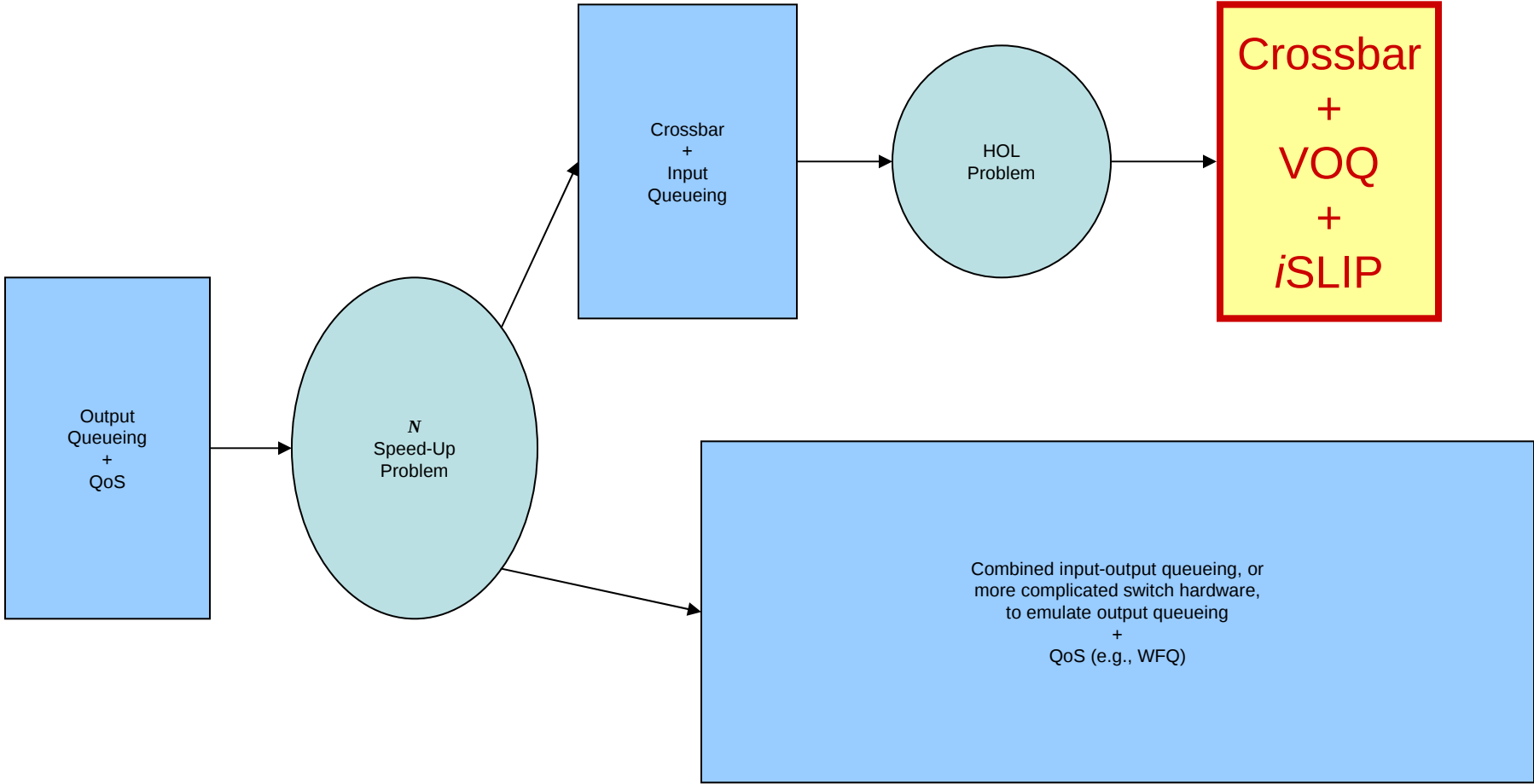


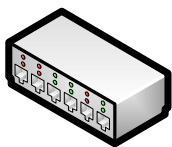
一个交换器的设计是否成功取决于工业界的偏好：
一、要简单；二、要符合交换器硬件的特点





因此我们的实时交换器设计必须符合 “crossbar + VOQ + *i*SLIP” 体系结构





什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ？

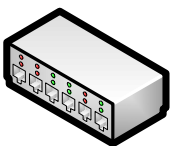
一种工业界普遍采纳的交换机体系结构

优点

简单

硬件利用率高

能够迅速调整适应随机的数据流量（特别是因特网数据流）



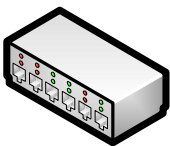
什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

输入端口

I1

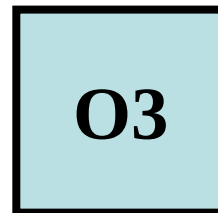
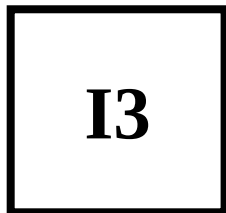
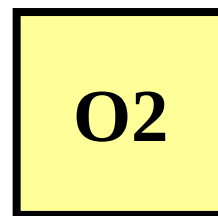
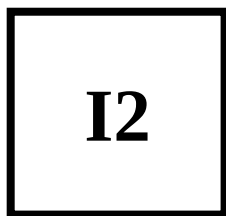
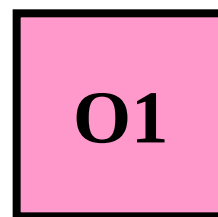
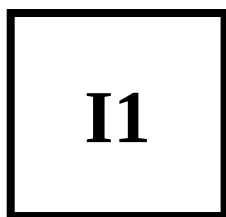
I2

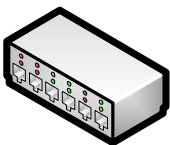
I3



什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

输出端口

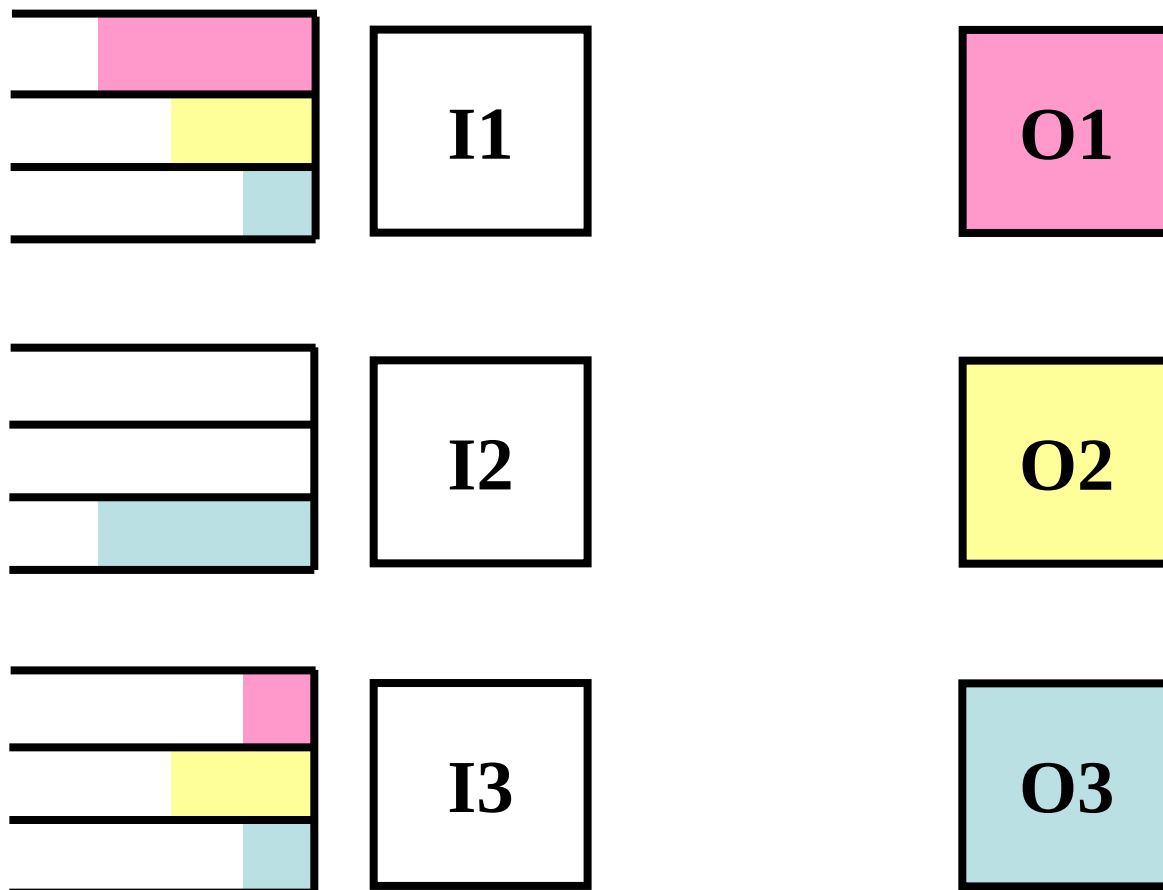


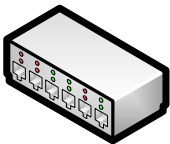


什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

虚拟输出端口队列

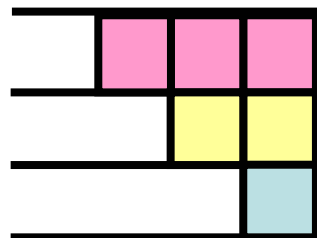
(Virtual Output Queue, VOQ)





什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

细胞(cells)



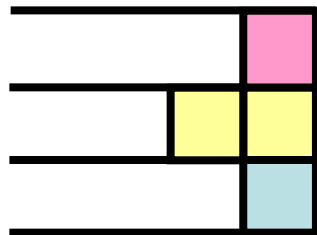
I1

O1



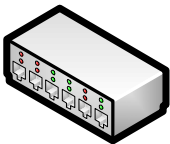
I2

O2

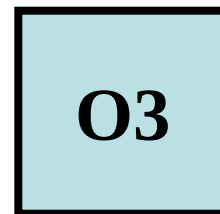
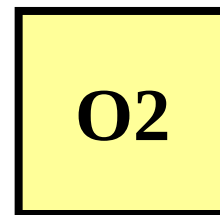
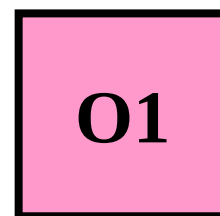
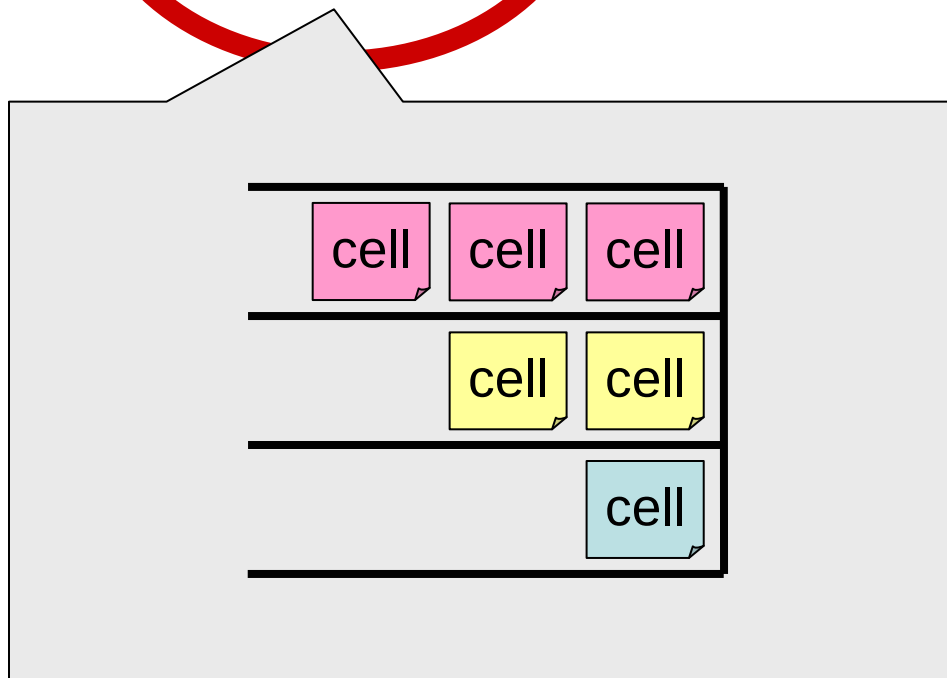
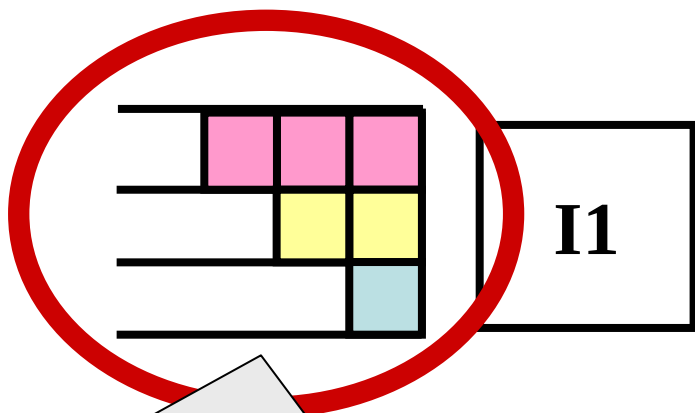


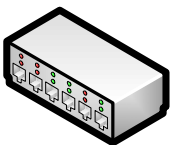
I3

O3



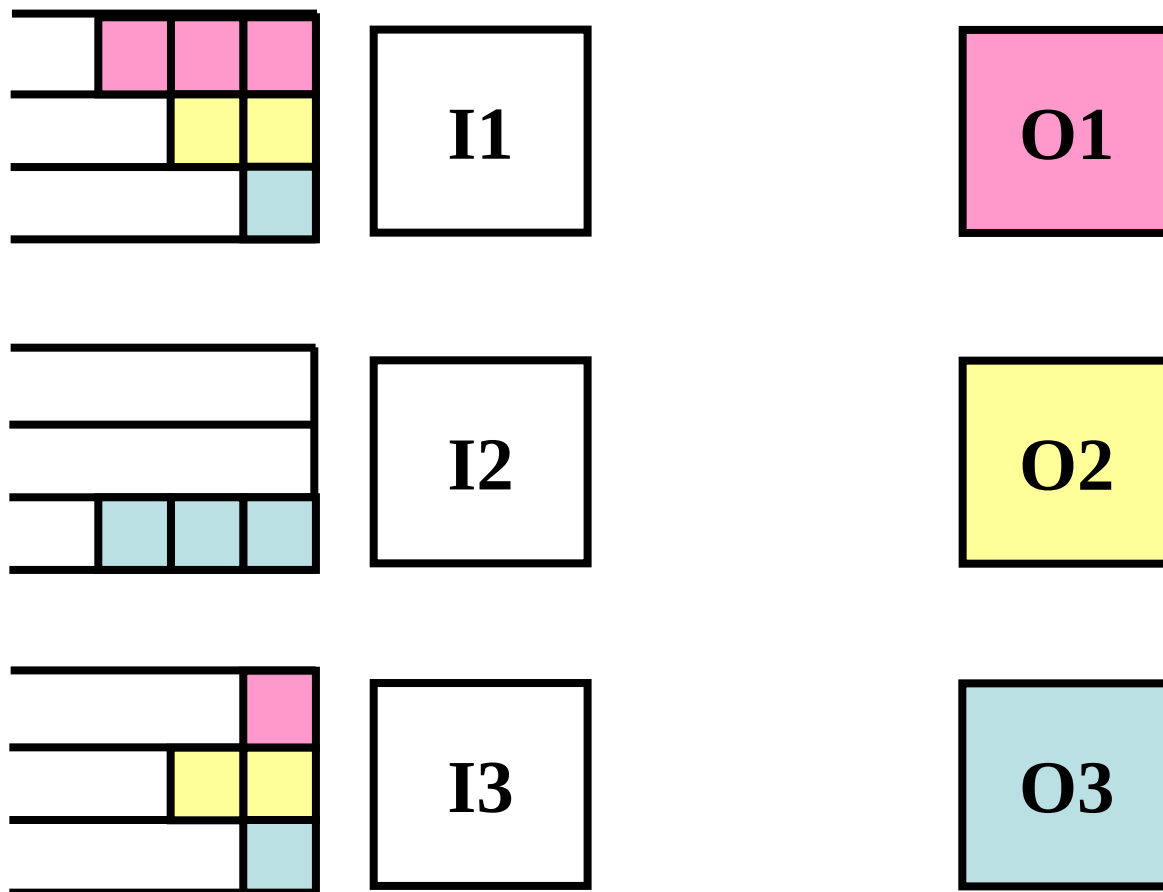
什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

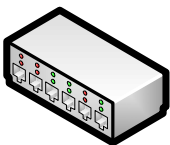




什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

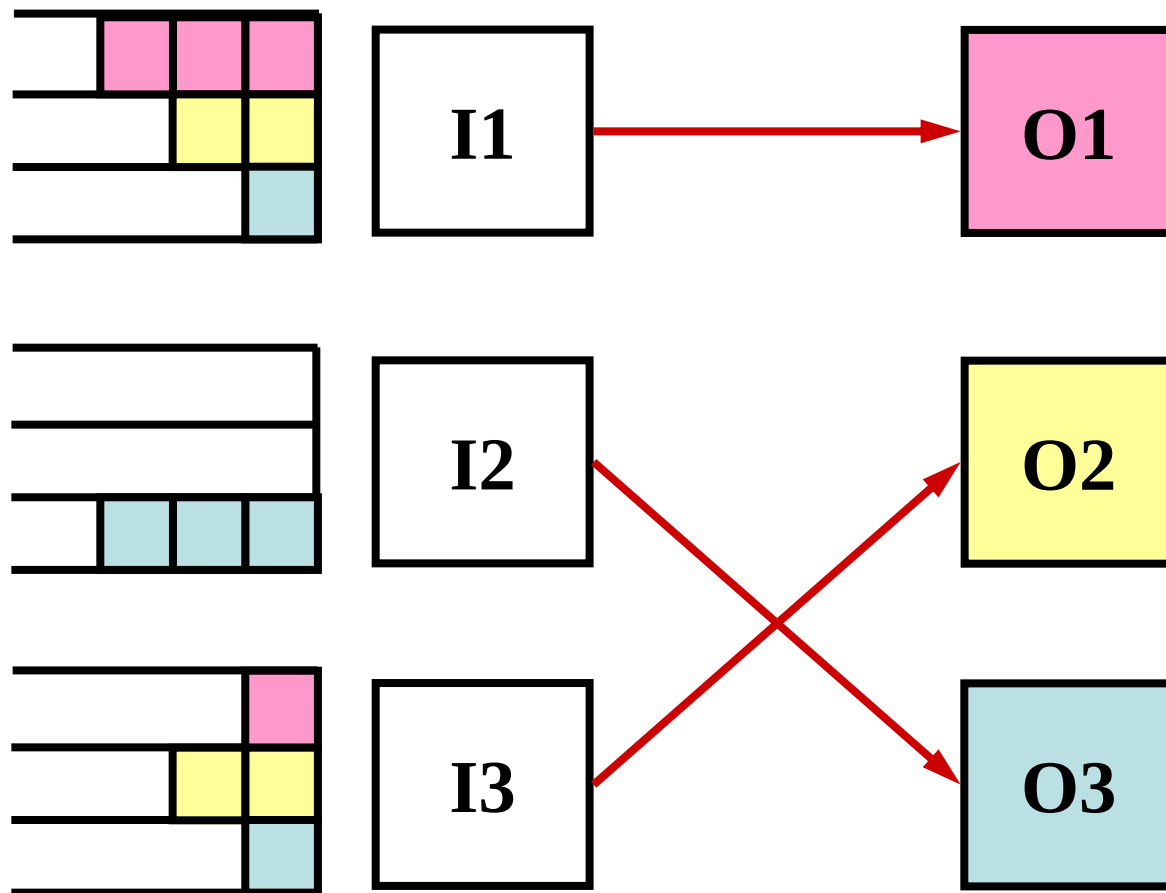
各个输入端口周期性同步地发送细胞至输出端口
周期：细胞时档（Cell-Time）

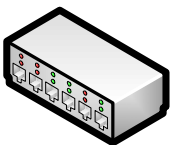




什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

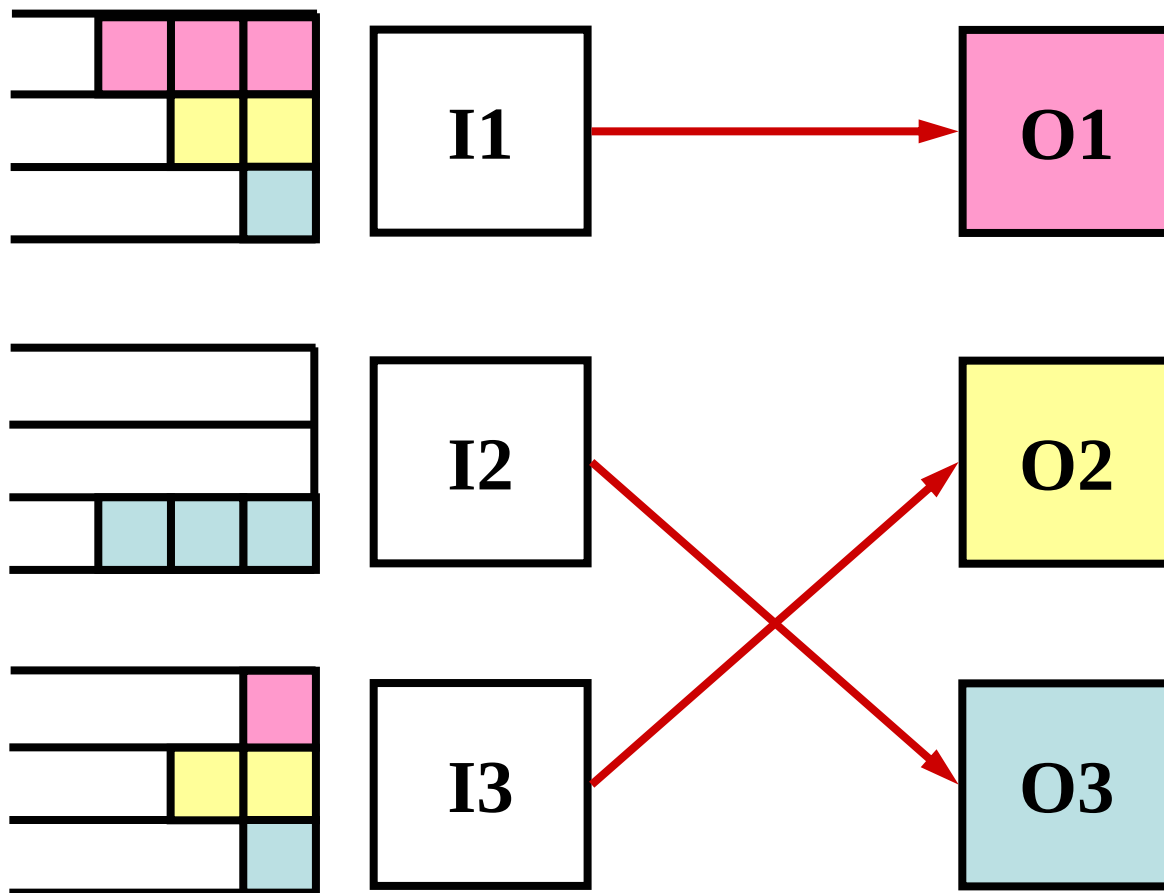
匹配

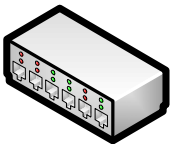




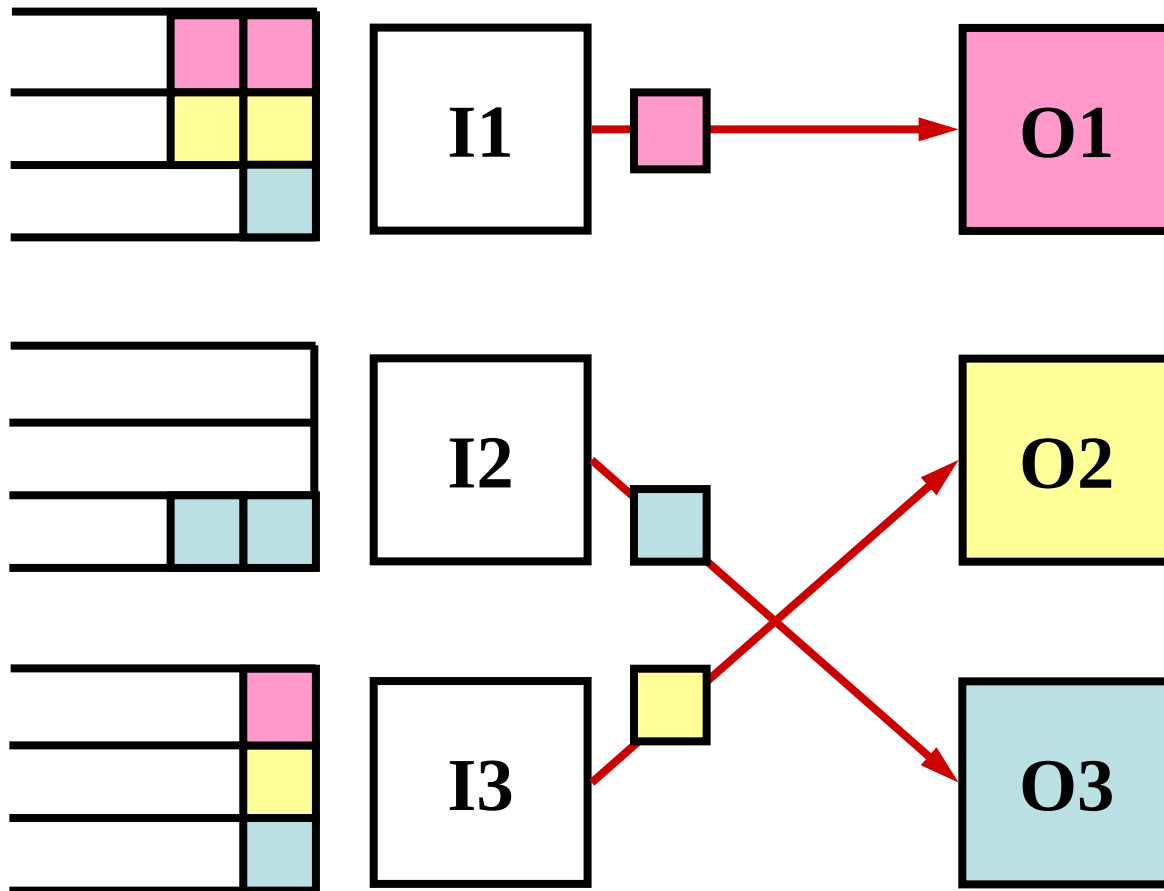
什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?

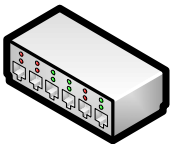
为什么必须匹配？一个输入（出）端口在每个细胞时档内最多只能发（收）一个细胞



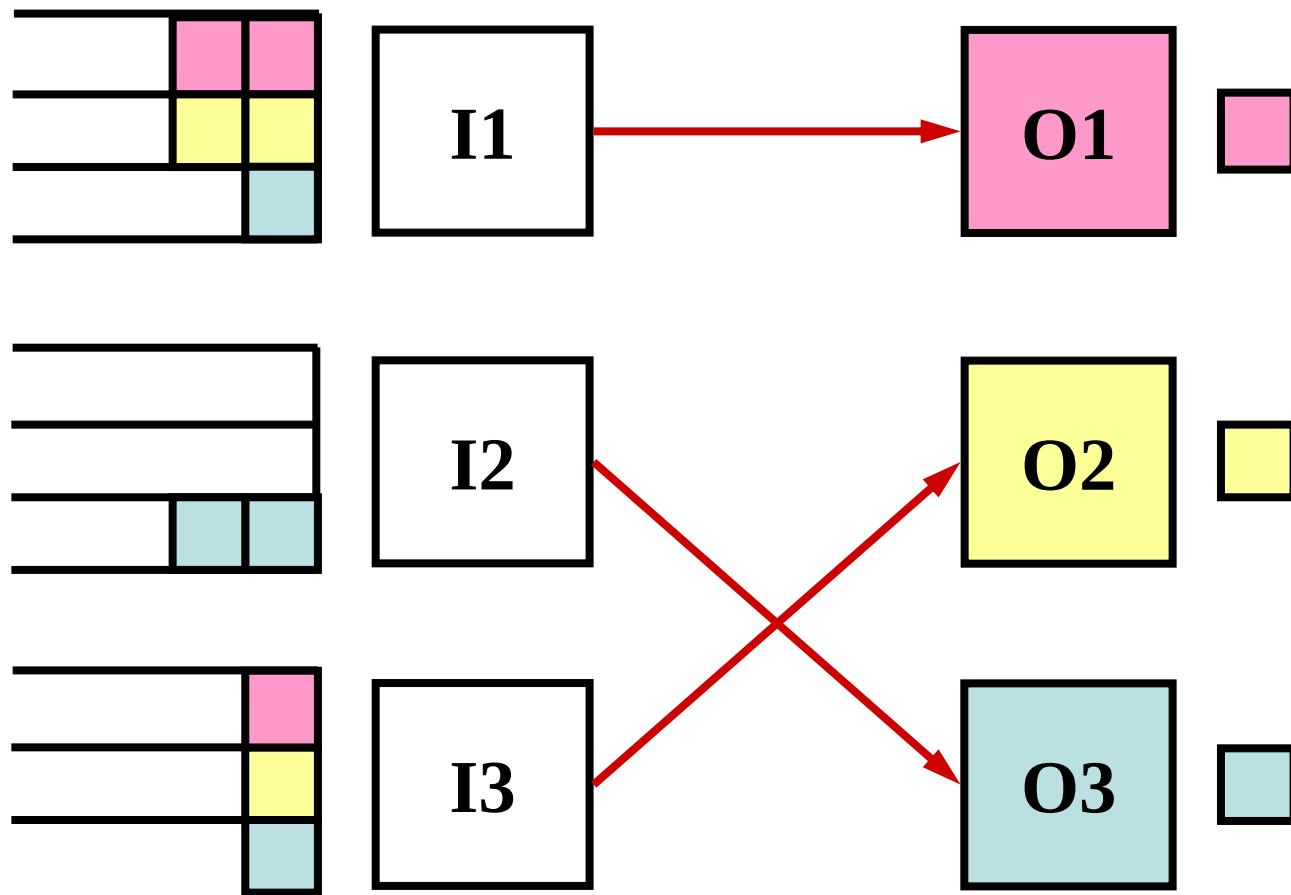


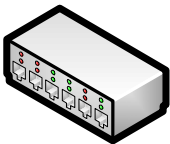
什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?



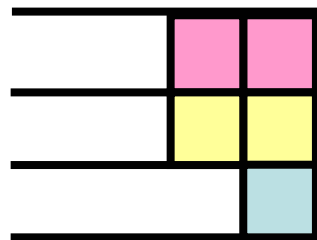


什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?





什么是 “Crossbar + VOQ + iSLIP” ?



I1

O1



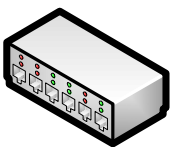
I2

O2

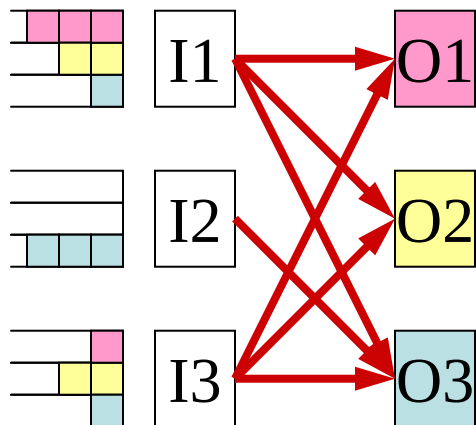


I3

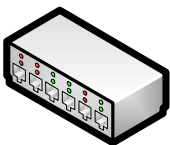
O3



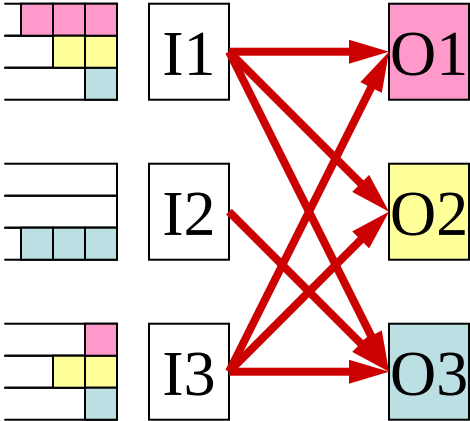
什么是“Crossbar + VOQ + *i*SLIP”？*i*SLIP是一种寻找匹配的算法，一种类似找工作的谈判机制😊



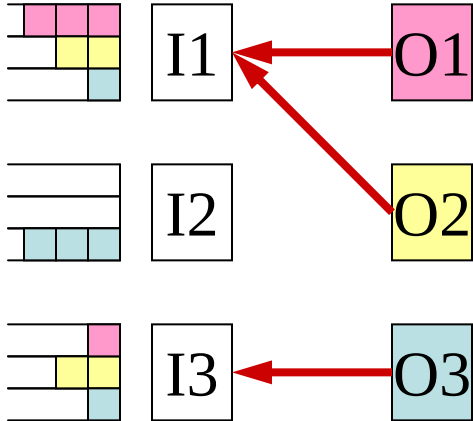
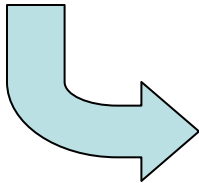
Request
(申请)



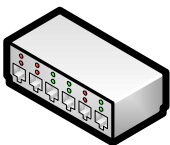
什么是“Crossbar + VOQ + *i*SLIP”？*i*SLIP是一种寻找匹配算法，一种类似找工作的谈判机制☺



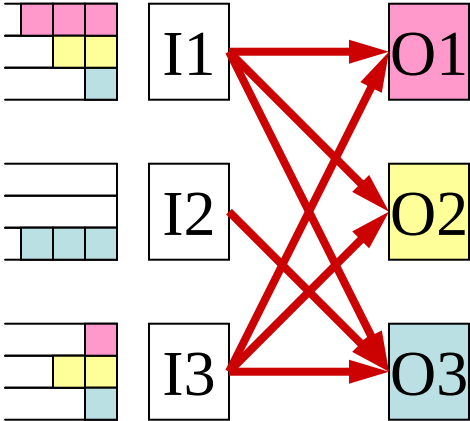
Request
(申请)



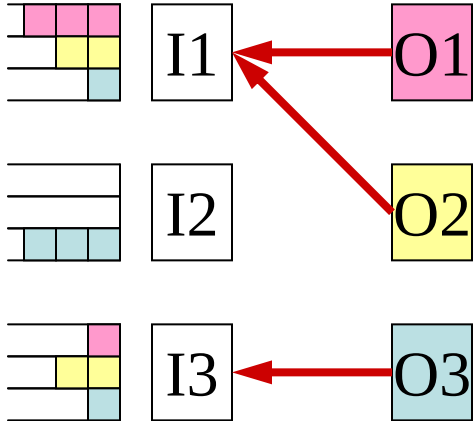
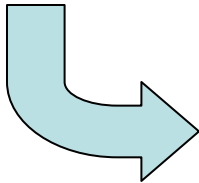
Grant
(发聘书)



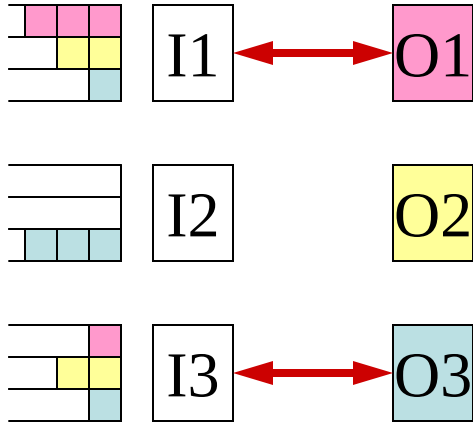
什么是“Crossbar + VOQ + *i*SLIP”？*i*SLIP是一种寻找匹配算法，一种类似找工作的谈判机制☺



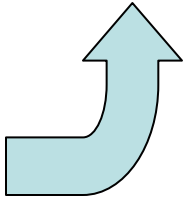
Request
(申请)

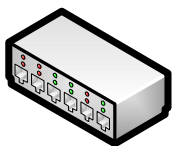


Grant
(发聘书)



Accept
(接受聘用)

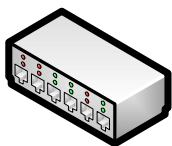




但是 “Crossbar + VOQ + *i*SLIP” 交换器并不能直接用作实时交换器

封装性 (isolation) 差导致单步转发耗时上限 (single hop delay bound) 很大

端到端通信耗时上限 (E2E delay bound) 仍未知
[Gopalakrishnan06].

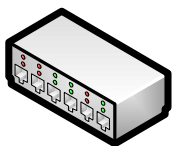


但是 “Crossbar + VOQ + *i*SLIP” 交换器并不能直接用作实时交换器

封装性 (isolation) 差导致单步转发耗时上限 (single hop delay bound) 很大

端到端通信耗时上限 (E2E delay bound) 仍未知
[Gopalakrishnan06].

该如何解决？



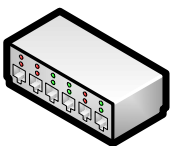
但是“Crossbar + VOQ + *i*SLIP”交换器并不能直接用作实时交换器

封装性 (isolation) 差导致单步转发耗时上限 (single hop delay bound) 很大

端到端通信耗时上限 (E2E delay bound) 仍未知
[Gopalakrishnan06].

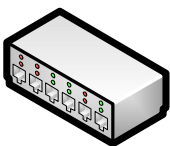
该如何解决?

着眼**前题条件的变化**和**新特点**。



前提条件的变化：数据流确定性

iSLIP用于非实时因特网数据流：随机性

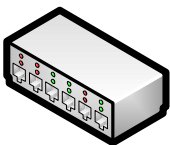


前提条件的变化：数据流确定性

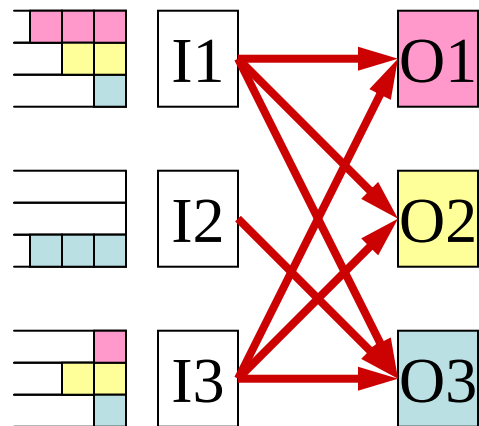
iSLIP用于非实时因特网数据流：随机性

数据流不稳定

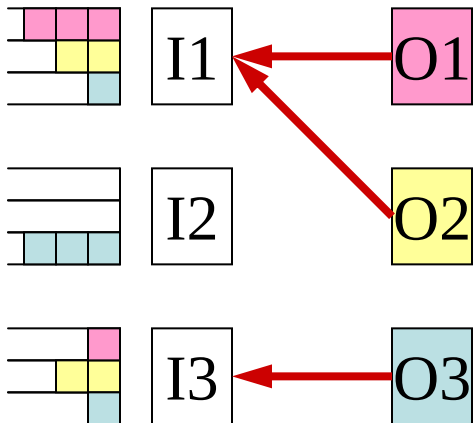
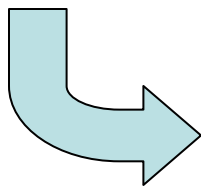
数据包大小和到达时刻难以预料



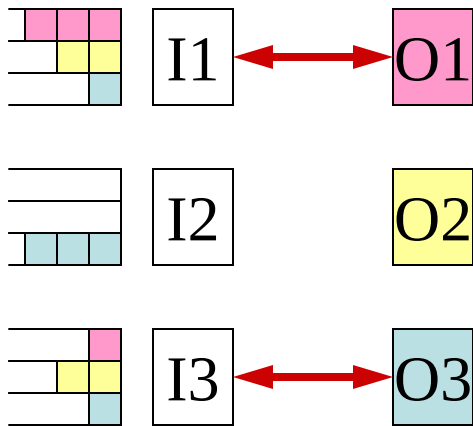
数据流的随机性迫使iSLIP必须为每个细胞时档谈判匹配输入/出端口



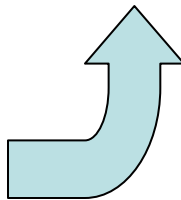
Request
(申请)

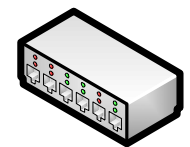


Grant
(发聘书)

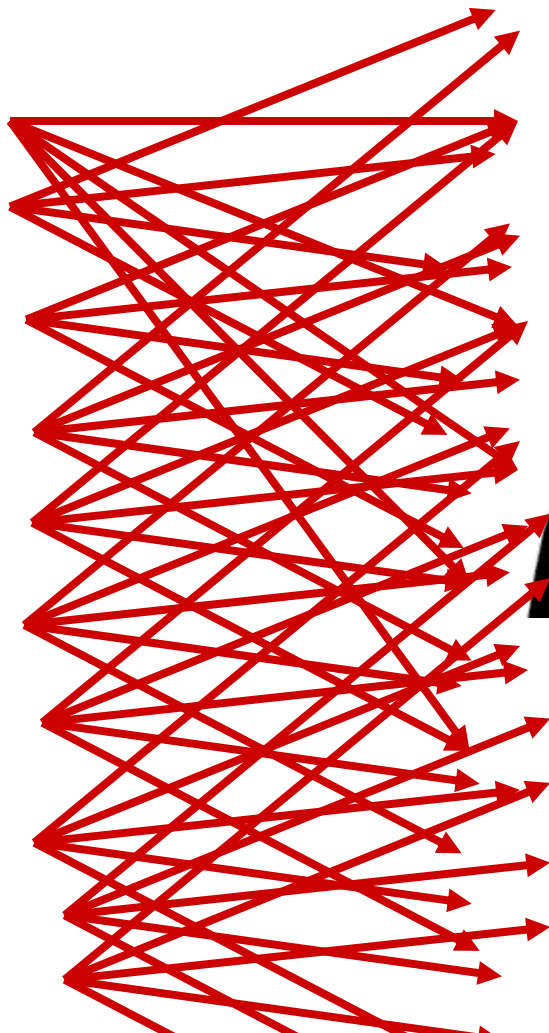


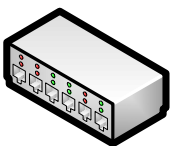
Accept
(接受聘用)





就像找工作一样，*i*SLIP这种基于谈判的匹配方式自然难以限制最坏情况的耗时。





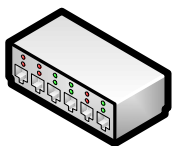
前提条件的变化：数据流确定性

iSLIP用于非实时因特网数据流：随机性

数据流不稳定

数据包大小和到达时刻难以预料

实时交换器用于实时应用数据流：确定性



前提条件的变化：数据流确定性

iSLIP用于非实时因特网数据流：随机性

数据流不稳定

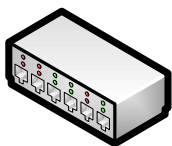
数据包大小和到达时刻难以预料

实时交换器用于实时应用数据流：确定性

数据流很少变化

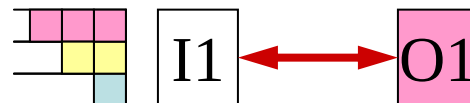
数据包大小既定，到达时刻规律

非实时数据流亦可作为实时数据流处理

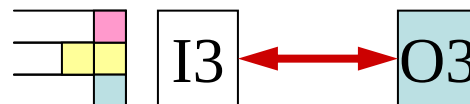


数据流的确定性使得实时交换器可以机械工作，无须谈判！

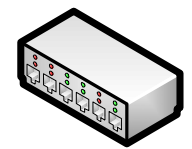
直接Grant（发聘书）即可



无须谈判（申请、接受聘书）

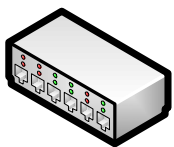


非但不必扩展iSLIP，反而更加简化



新特点：数据包间隔周期长，便于分时（time slicing）

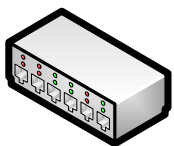
实时数据流



新特点：数据包间隔周期长，便于分时（time slicing）

实时数据流

数据包短小（传感：1细胞/数据包，电视画质的视频：480细胞/数据包）

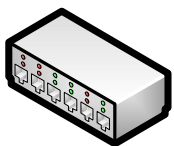


新特点：数据包间隔周期长，便于分时（time slicing）

实时数据流

数据包短小（传感：1细胞/数据包，电视画质的视频：480细胞/数据包）

每个数据包的传输时间短（传感：0.5 μ s，视频：240 μ s）



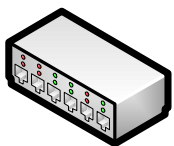
新特点：数据包间隔周期长，便于分时（time slicing）

实时数据流

数据包短小（传感：1细胞/数据包，电视画质的视频：480细胞/数据包）

每个数据包的传输时间短（传感：0.5 μ s，视频：240 μ s）

同各数据流内数据包间隔周期长（传感：10ms，视频：30ms）



新特点：数据包间隔周期长，便于分时（time slicing）

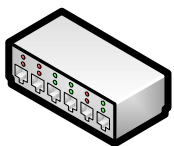
实时数据流

数据包短小（传感：1细胞/数据包，电视画质的视频：480细胞/数据包）

每个数据包的传输时间短（传感：0.5 μ s，视频：240 μ s）

同各数据流内数据包间隔周期长（传感：10ms，视频：30ms）

类似于分时操作系统



新特点：数据包间隔周期长，便于分时（time slicing）

实时数据流

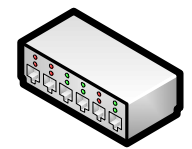
数据包短小（传感：1细胞/数据包，电视画质的视频：480细胞/数据包）

每个数据包的传输时间短（传感：0.5 μ s，视频：240 μ s）

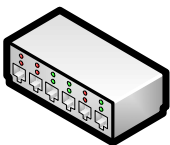
同各数据流内数据包间隔周期长（传感：10ms，视频：30ms）

类似于分时操作系统

实时交换器采用细粒度的时钟周期（例如1 μ s），每个时间片是一个细胞时档，服务于一个周期为粗时间粒度的实时数据流。



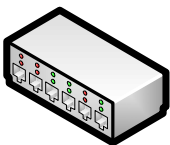
解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。



解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

每个调度周期包含 M 个细胞时档，例如 $M = 5$

Cell time:	1	2	3	4	5
$I1:$					
$I2:$					
$I3:$					
$I4:$					

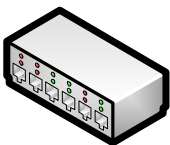


解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

每个调度周期包含 M 个细胞时档，例如 $M = 5$

将实时任务的周期调整为调度周期：例如 $(11, 3) \rightarrow (5, 2)$ ，即 $(10, 4)$

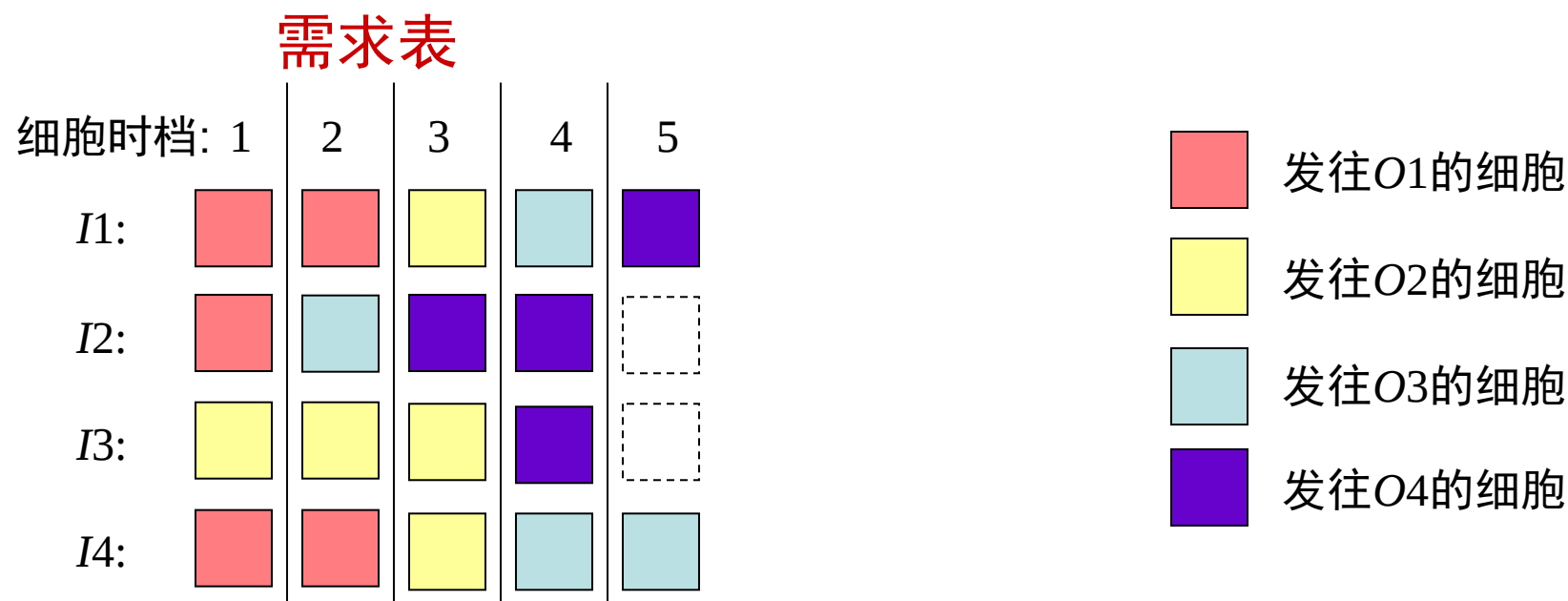
细胞时档:	1	2	3	4	5
I_1 :					
I_2 :					
I_3 :					
I_4 :					

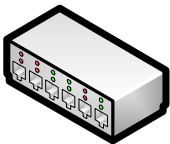


解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

每个调度周期包含 M 个细胞时档，例如 $M = 5$

将实时任务的周期调整为调度周期：例如 $(11, 3) \rightarrow (5, 2)$ ，即 $(10, 4)$





解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

调度周期： M 个细胞时档

调整实时任务周期为调度周期

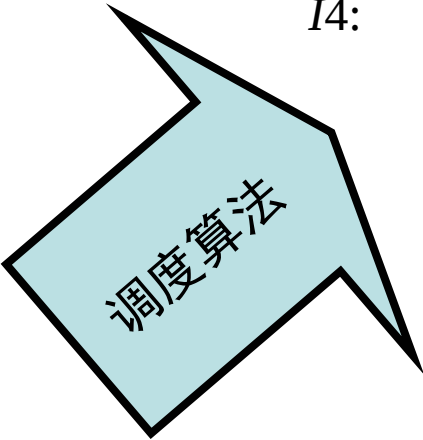
配置时调度算法时间复杂度 ($O(N^4)$)

需求表

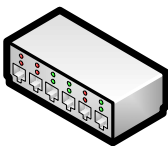
细胞时档:	1	2	3	4	5
$I1:$					
$I2:$					
$I3:$					
$I4:$					

调度方案

细胞时档:	1	2	3	4	5
$I1:$					
$I2:$					
$I3:$					
$I4:$					

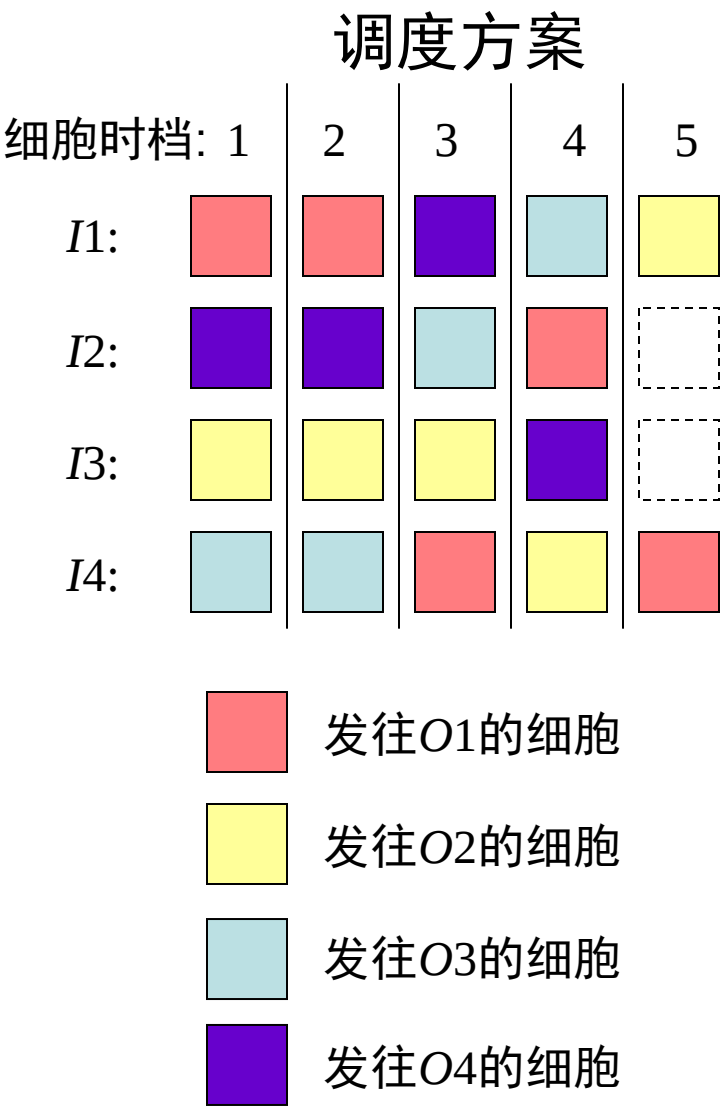


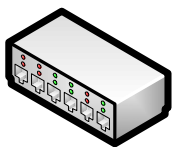
- 发往O1的细胞
- 发往O2的细胞
- 发往O3的细胞
- 发往O4的细胞



解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

- 调度周期： M 个细胞时档
- 调整实时任务周期为调度周期
- 配置时调度算法时间复杂度 ($O(N^4)$)
- 运行时按照既定调度方案调度





解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

调度周期： M 个细胞时档

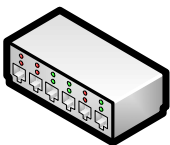
调整实时任务周期为调度周期

配置时调度算法时间复杂度 ($O(N^4)$)

运行时按照既定调度方案调度

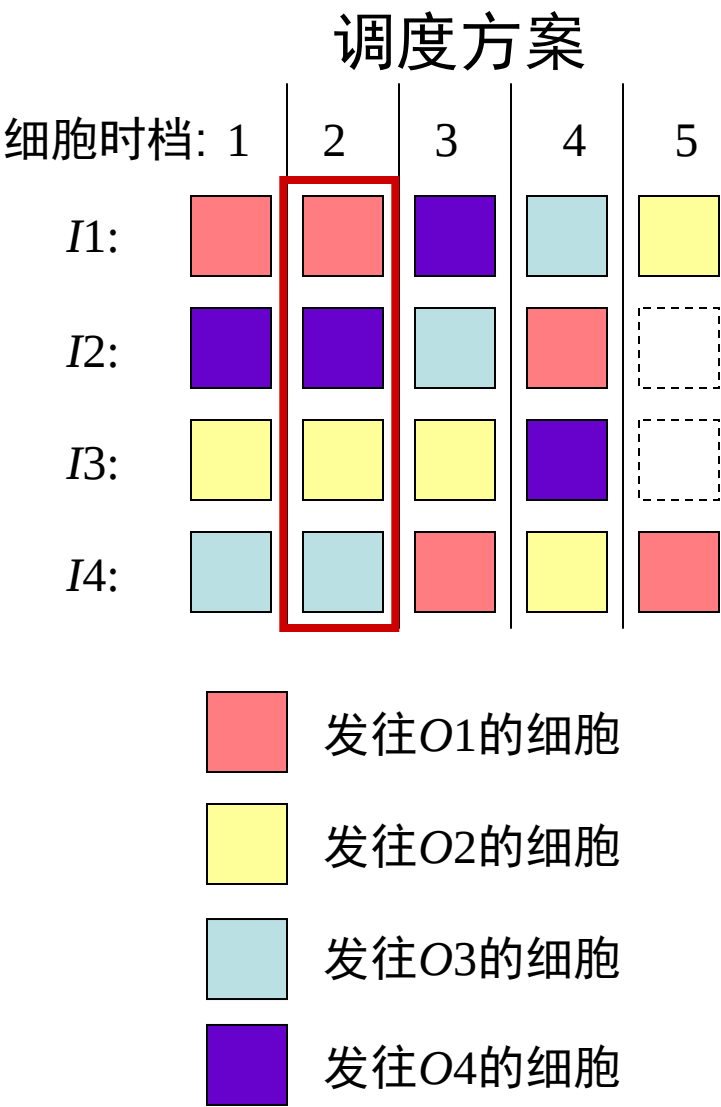
		调度方案				
细胞时档:		1	2	3	4	5
$I1:$						
$I2:$						
$I3:$						
$I4:$						

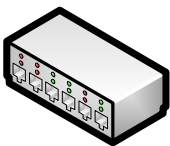
 发往O1的细胞
 发往O2的细胞
 发往O3的细胞
 发往O4的细胞



解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

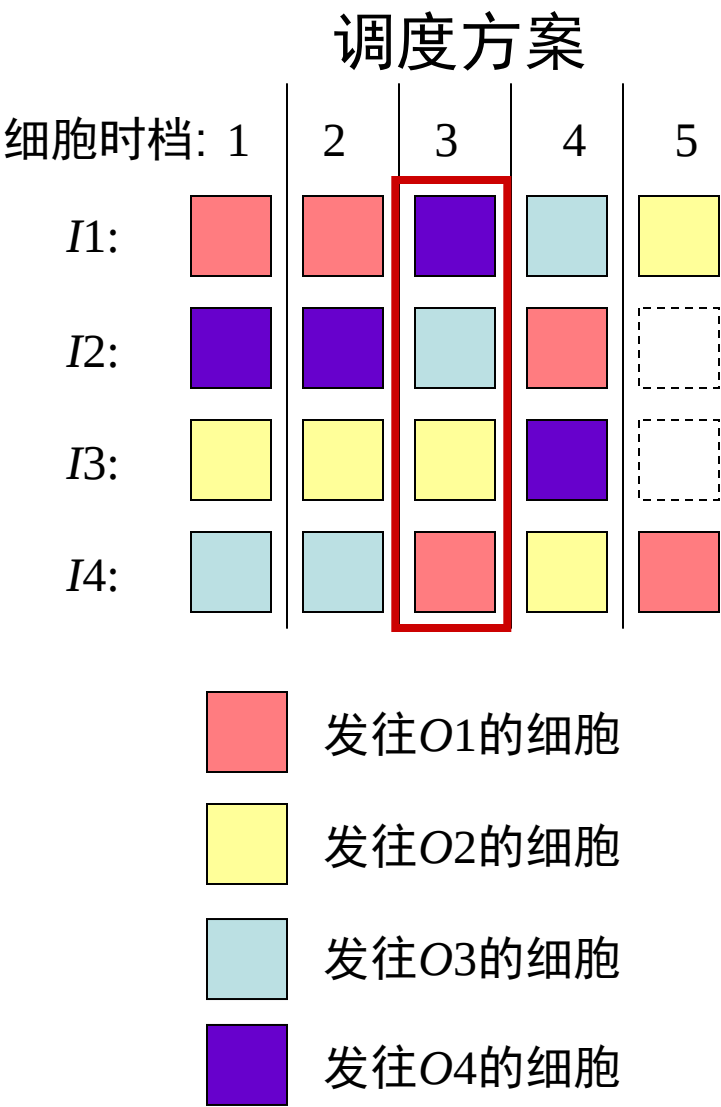
- 调度周期： M 个细胞时档
- 调整实时任务周期为调度周期
- 配置时调度算法时间复杂度 ($O(N^4)$)
- 运行时按照既定调度方案调度

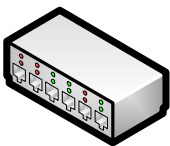




解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

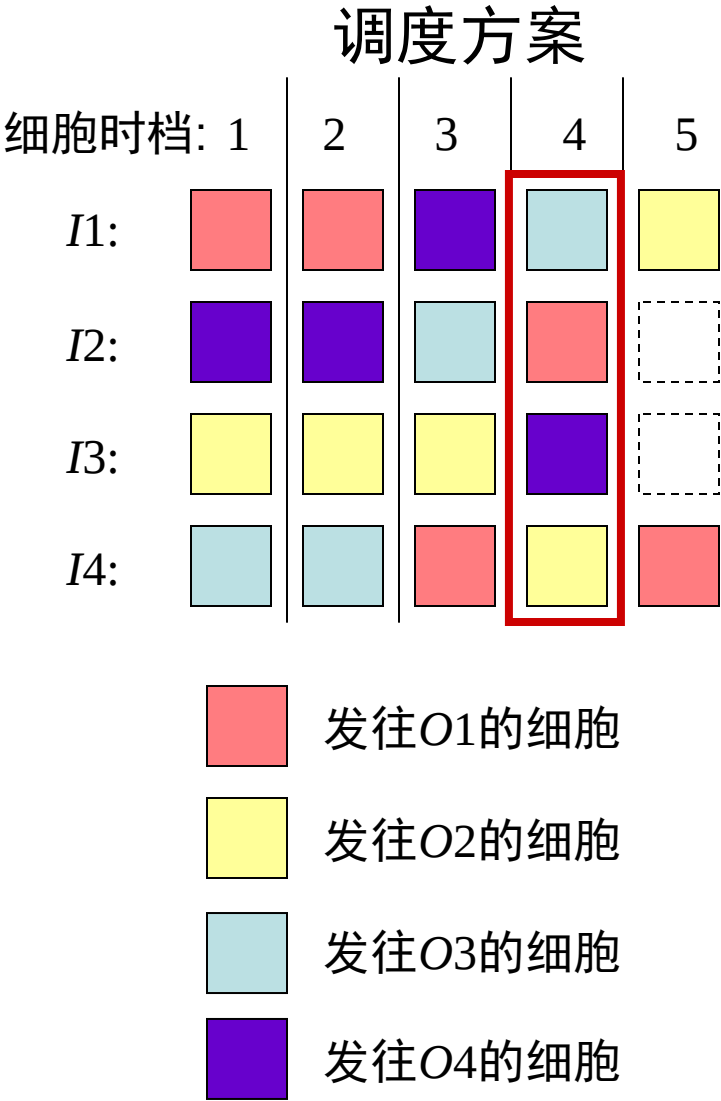
- 调度周期： M 个细胞时档
- 调整实时任务周期为调度周期
- 配置时调度算法时间复杂度 ($O(N^4)$)
- 运行时按照既定调度方案调度

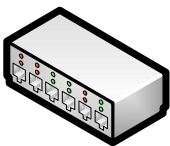




解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

- 调度周期： M 个细胞时档
- 调整实时任务周期为调度周期
- 配置时调度算法时间复杂度 ($O(N^4)$)
- 运行时按照既定调度方案调度





解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

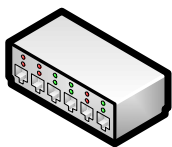
调度周期： M 个细胞时档

调整实时任务周期为调度周期

配置时调度算法时间复杂度 ($O(N^4)$)

运行时按照既定调度方案调度

		调度方案				
细胞时档:		1	2	3	4	5
$I1:$						
$I2:$						
$I3:$						
$I4:$						
		 发往O1的细胞				
		 发往O2的细胞				
		 发往O3的细胞				
		 发往O4的细胞				

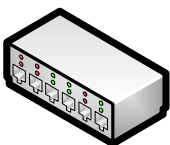


解决方案：crossbar实时交换器应运行分时调度，而调度方案是既定的。

优点：

- 实时性
- 兼容性
- 简单
- 高性能
- 封装性

		调度方案				
细胞时档：		1	2	3	4	5
I_1 :						
I_2 :						
I_3 :						
I_4 :						
		 发往O1的细胞				
		 发往O2的细胞				
		 发往O3的细胞				
		 发往O4的细胞				

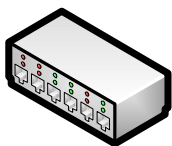


评估：可调度性

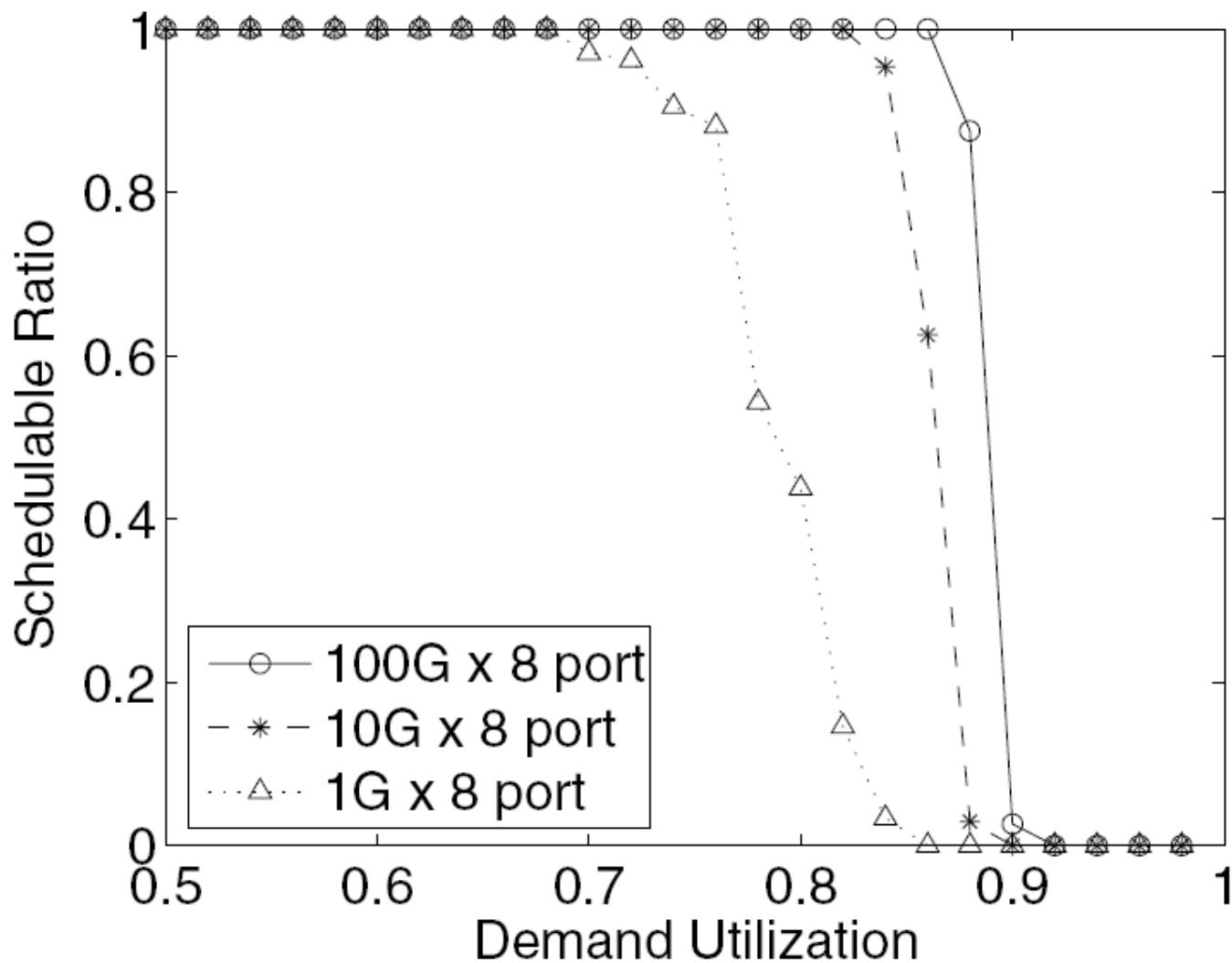
根据典型的实时工控/医疗应用模型，随机生成网络通信需求

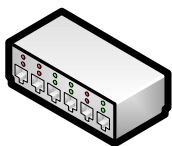
所生成网络需求的网络利用率为 U

若一个网络需求的网络利用率为 U ，该需求有多大几率能被满足（可调度）？

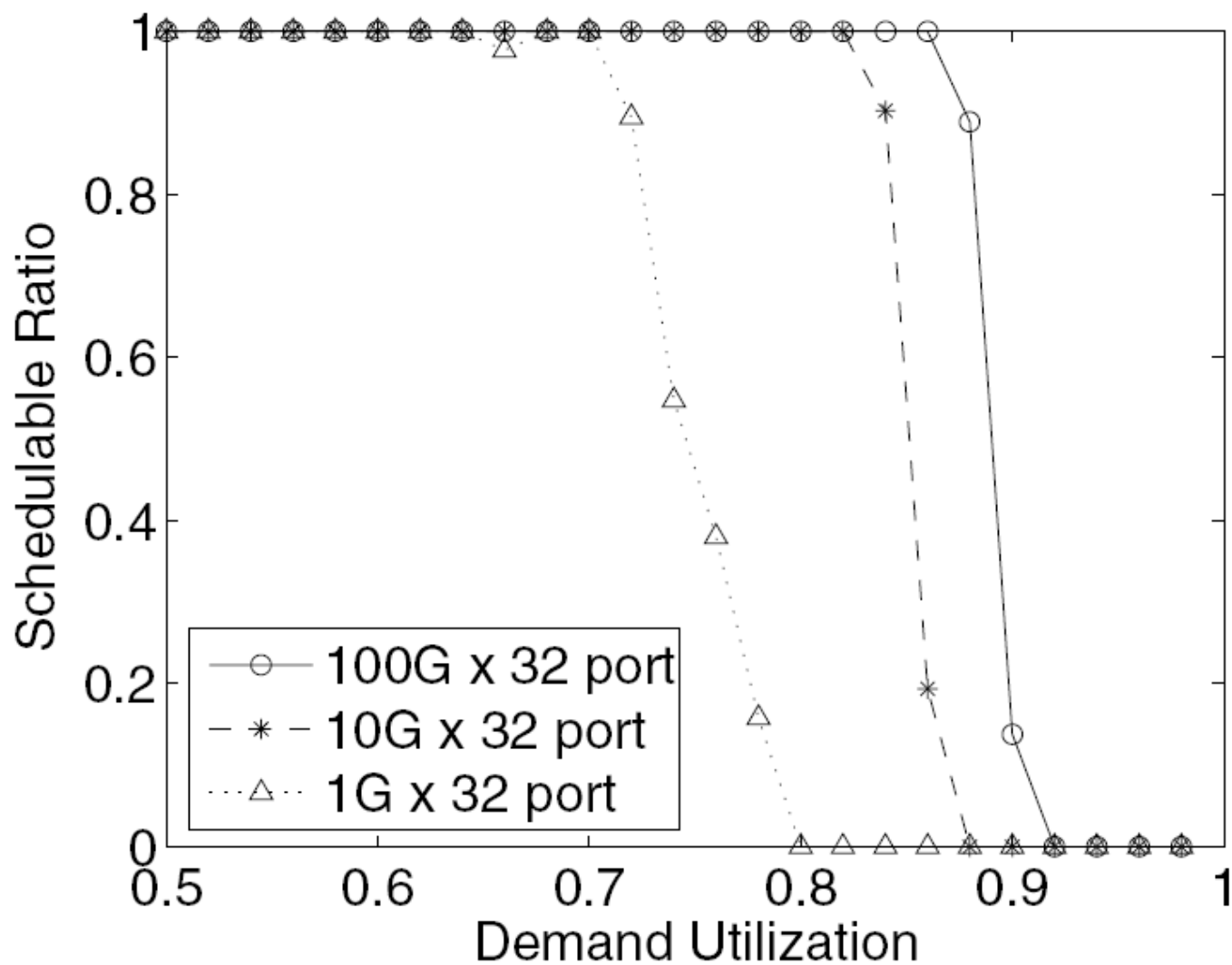


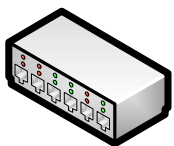
评估：可调度性





评估：可调度性





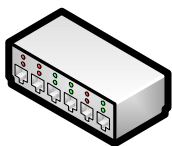
评估：端到端耗时上限

根据典型的实时工控/医疗应用模型，随机生成网络通信需求

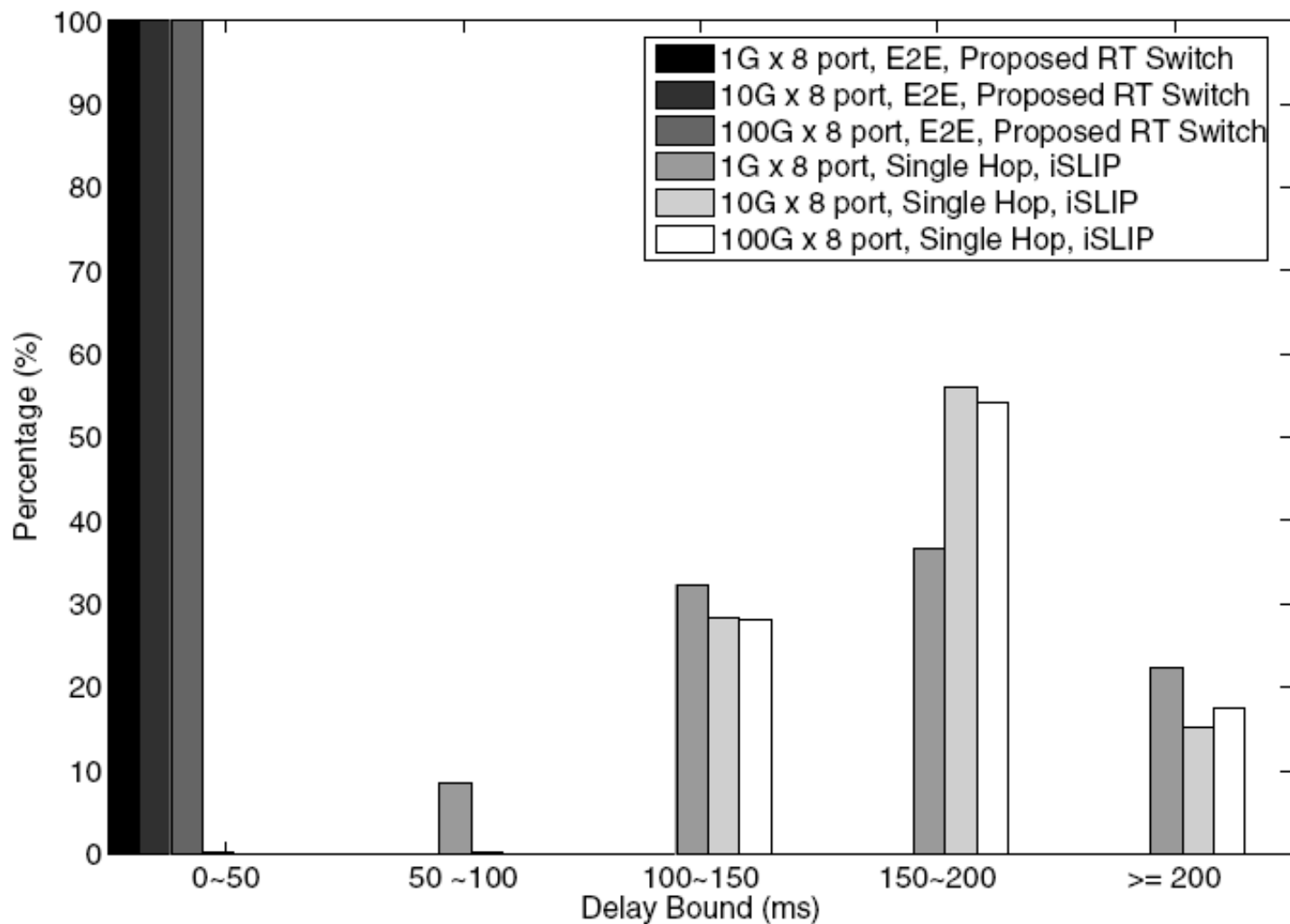
最多经由15个交换器

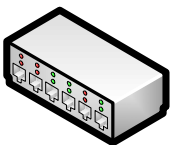
比较：

实时交换器网络端到端耗时上限
单个iSLIP交换器耗时上限

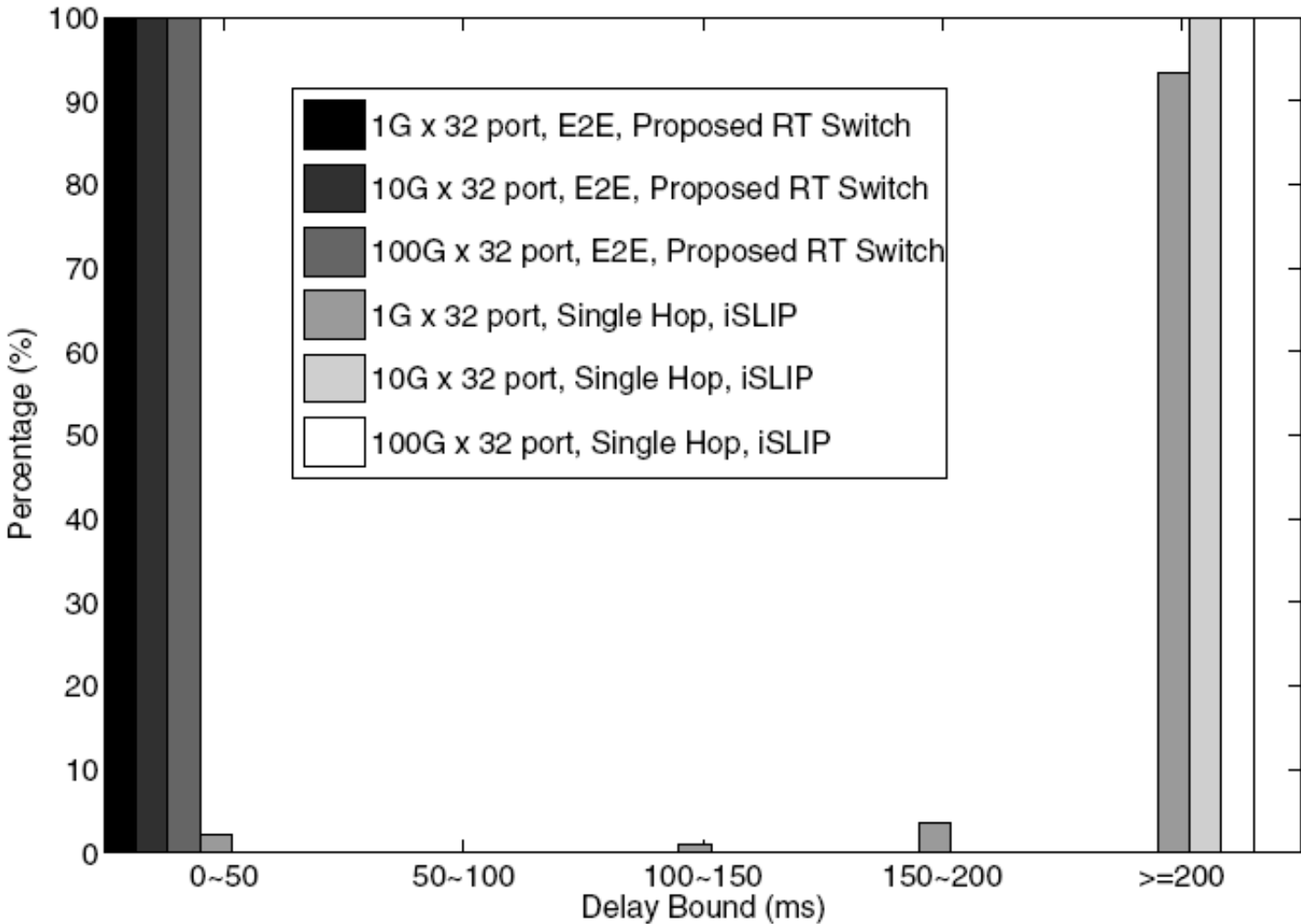


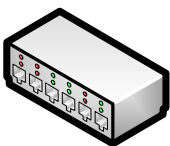
评估：端到端耗时上限





评估：端到端耗时上限





结论

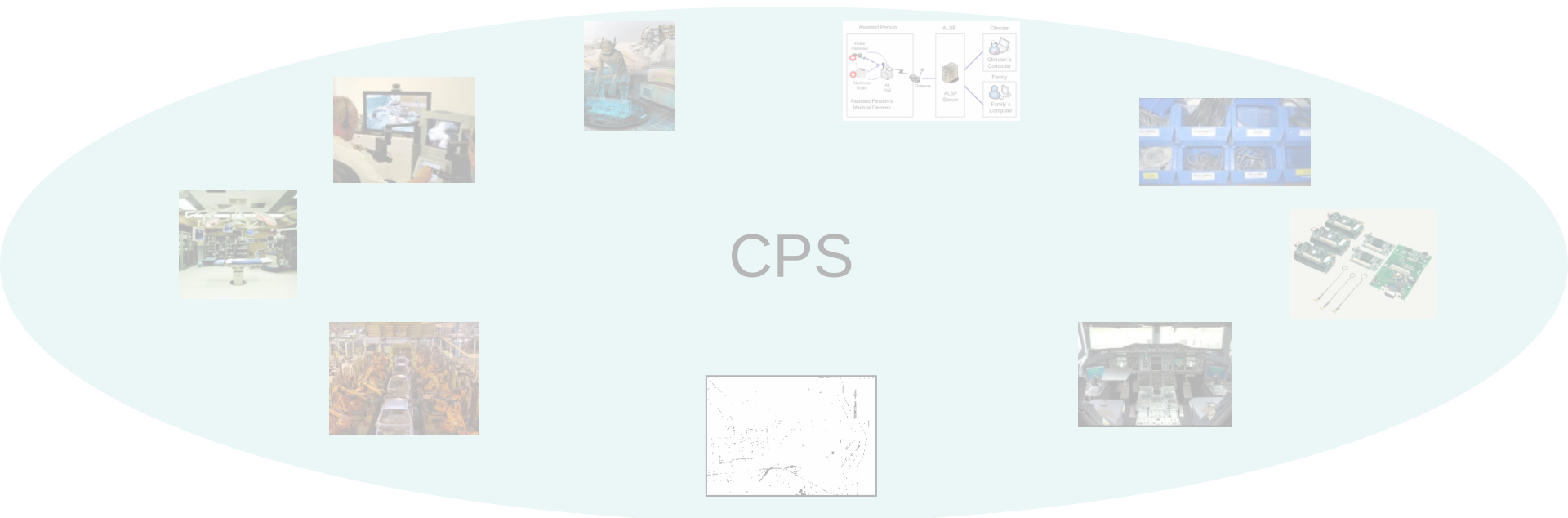
端到端耗时上限小

可调度性高，硬件利用率高（100%）

兼容、简化了主流的crossbar+VOQ+iSLIP交换器

运行时时间复杂度为 $O(1)$

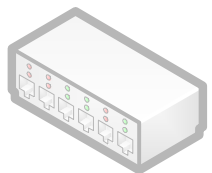
配置时调度算法时间复杂度为多项式时间



CPS



Middleware



Real-Time
Switch



**Real-Time
Wireless LAN
实时无限局域网**



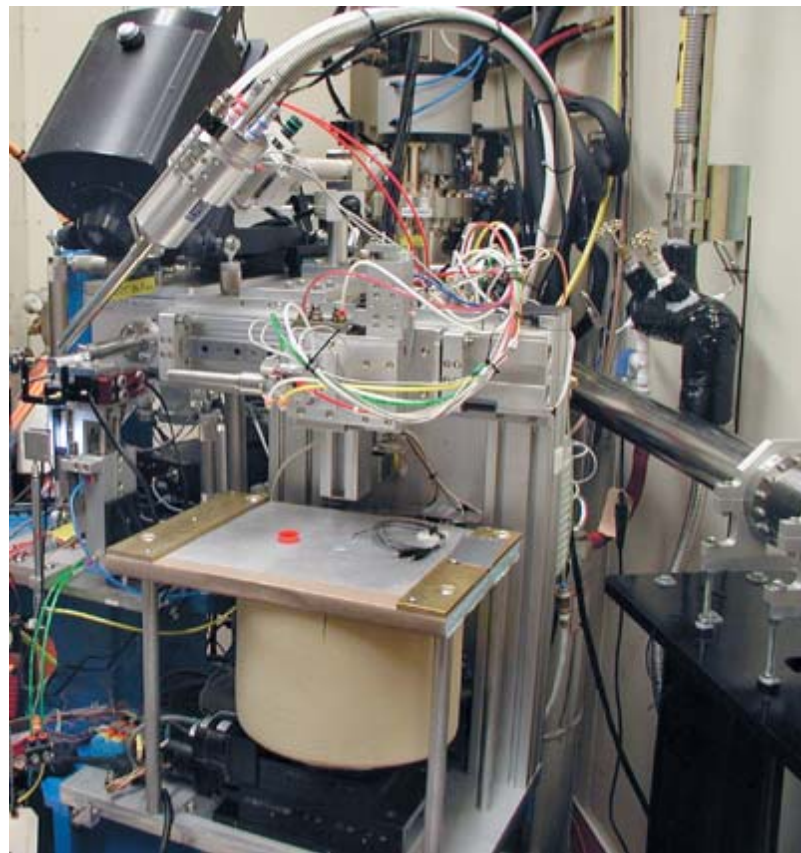
Real-Time
Localization



实时无线通讯的需求在增加

自由度多、移动性好

易安装/改装（柔性好）





实时无线通讯的需求在增加

在手术麻醉中用于连接电子医疗记录仪（anesthesia EMR）的各种导线





实时无线通讯的需求在增加

降低被电缆绊倒造成事故的可能性



↑
将来

← 目前



实时无线通讯的最大挑战在于其**可靠性**。

即便无线信道条件恶劣也不能退后（backoff）



实时无线通讯的最大挑战在于其**可靠性**。

即便无线信道条件恶劣也不能退后（backoff）





实时无线通讯的最大挑战在于其**可靠性**。

恶劣的信道条件屡见不鲜

Large scale path-loss

Multipath

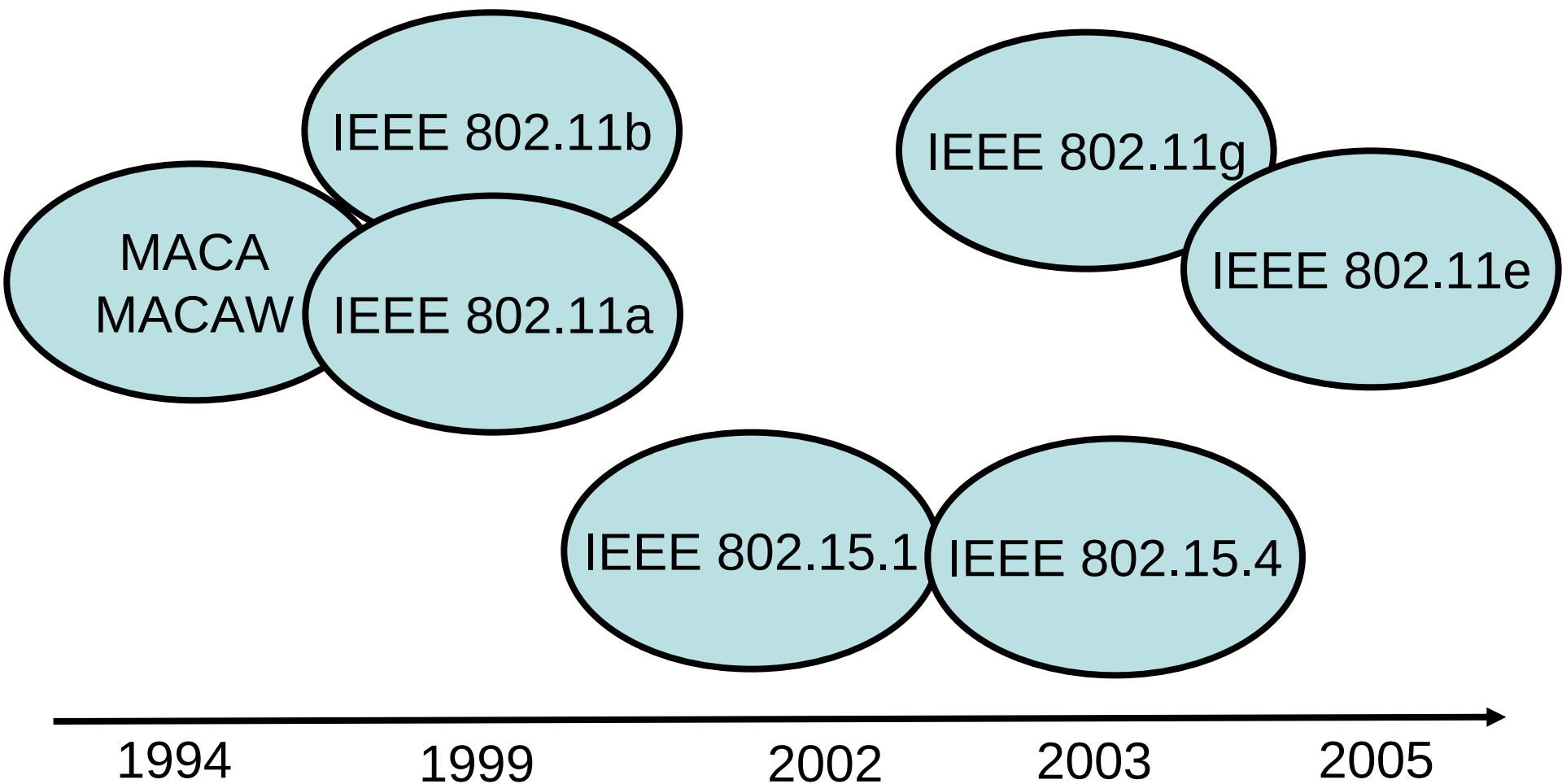
不间断的电磁干扰

Same-band / adjacent-band RF devices





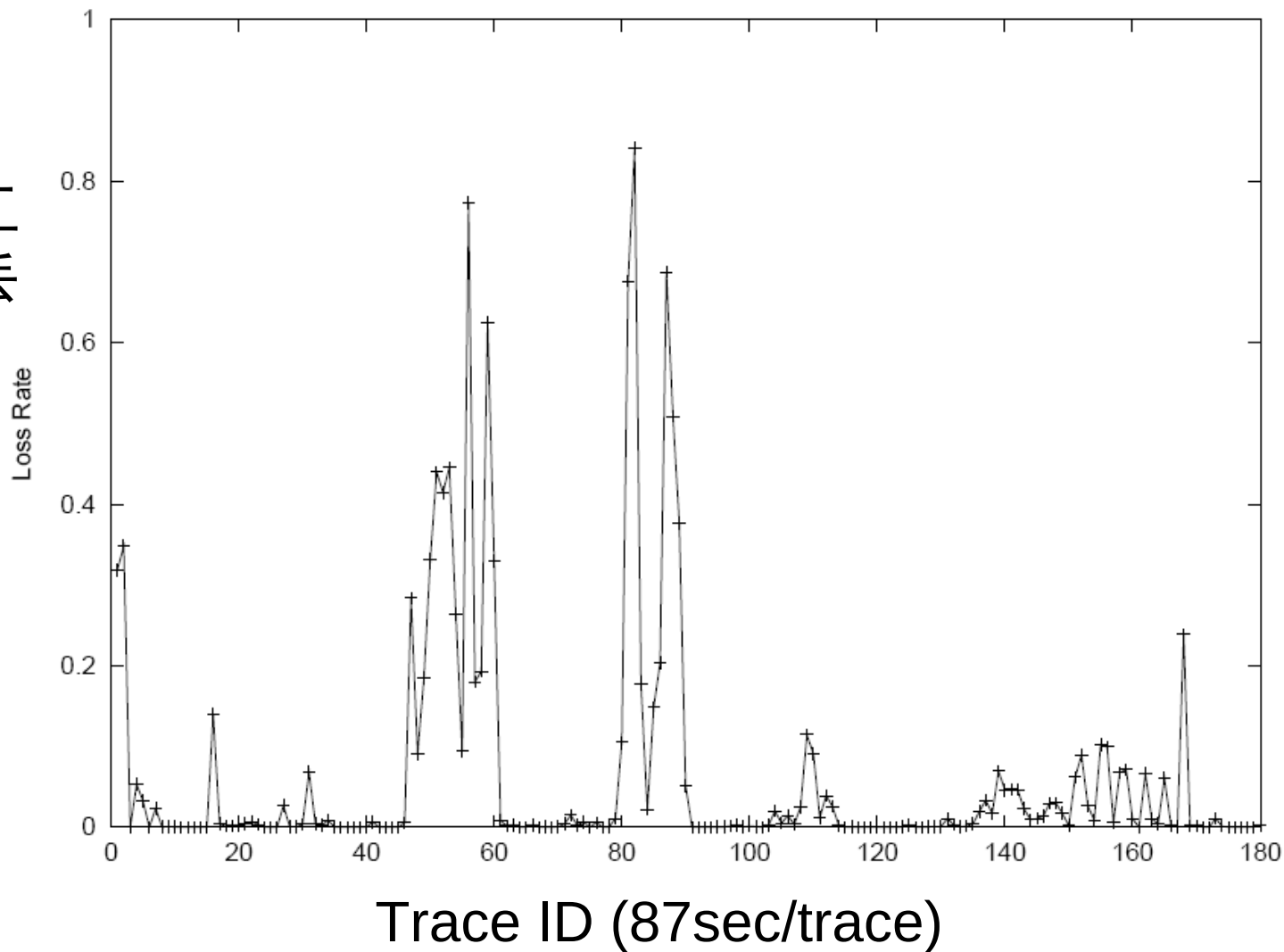
当前的无线局域网标准均非实时





当前的无线局域网标准均非实时

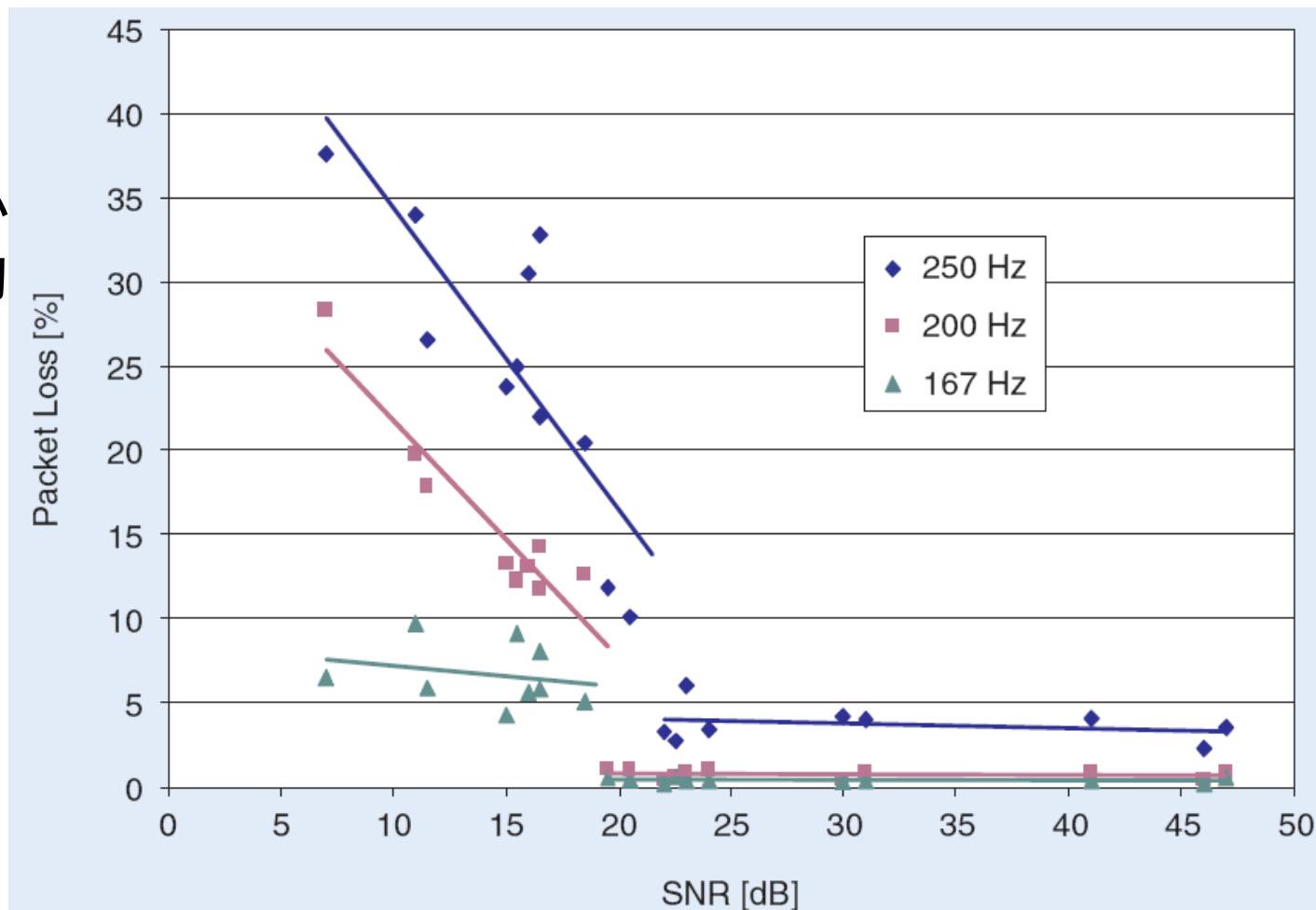
IEEE 802.11
在一个典型工
业环境中的丢
包率
[Willig02]





当前的无线局域网标准均非实时

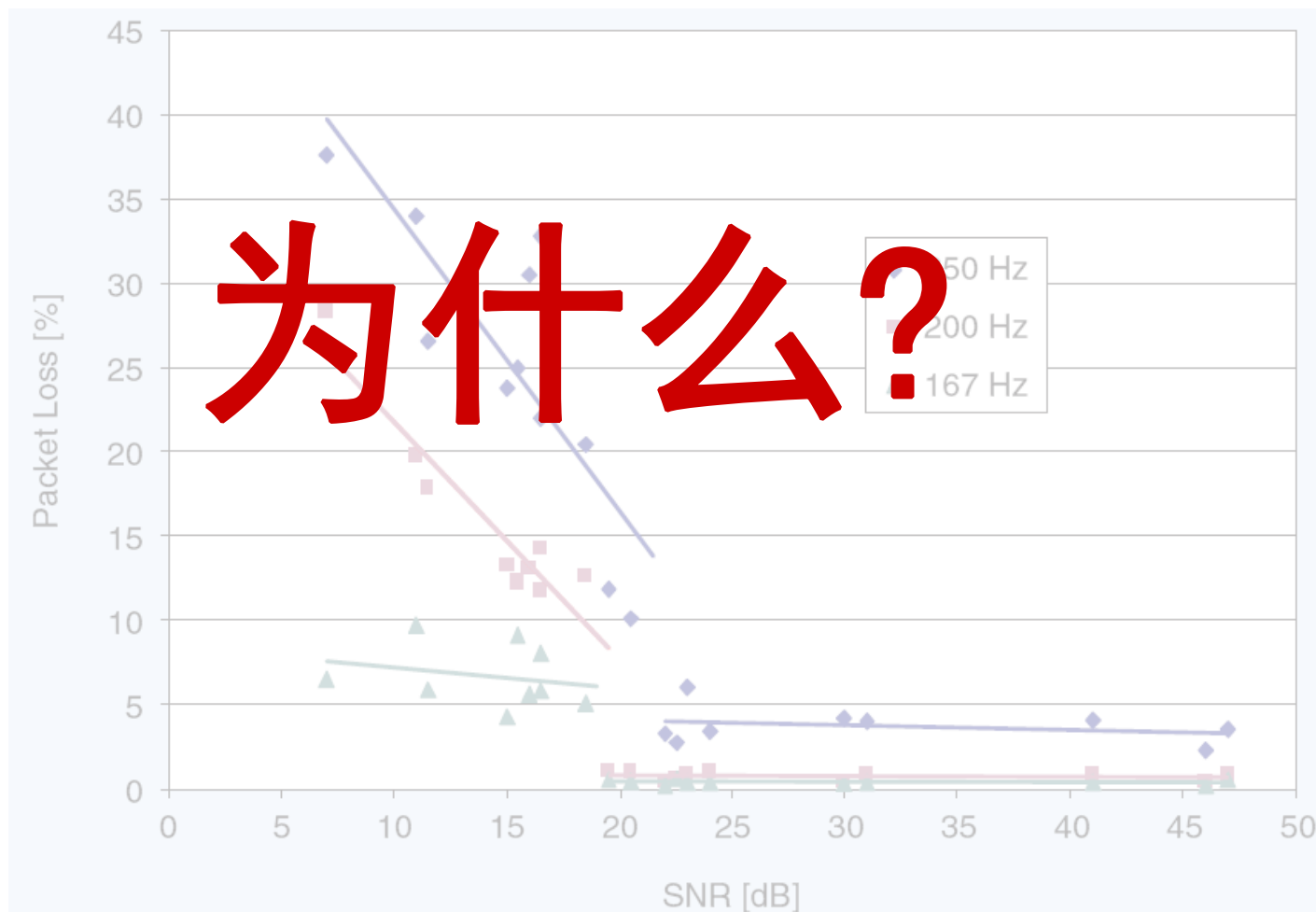
IEEE 802.11
在一个典型办
公室环境中的
丢包率
[Ploplys04]

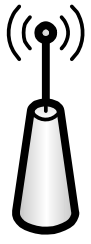




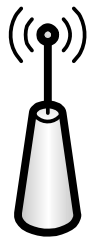
当前的无线局域网标准均非实时

IEEE 802.11
packet loss
rate in an
office
environment
[Ploplys04]

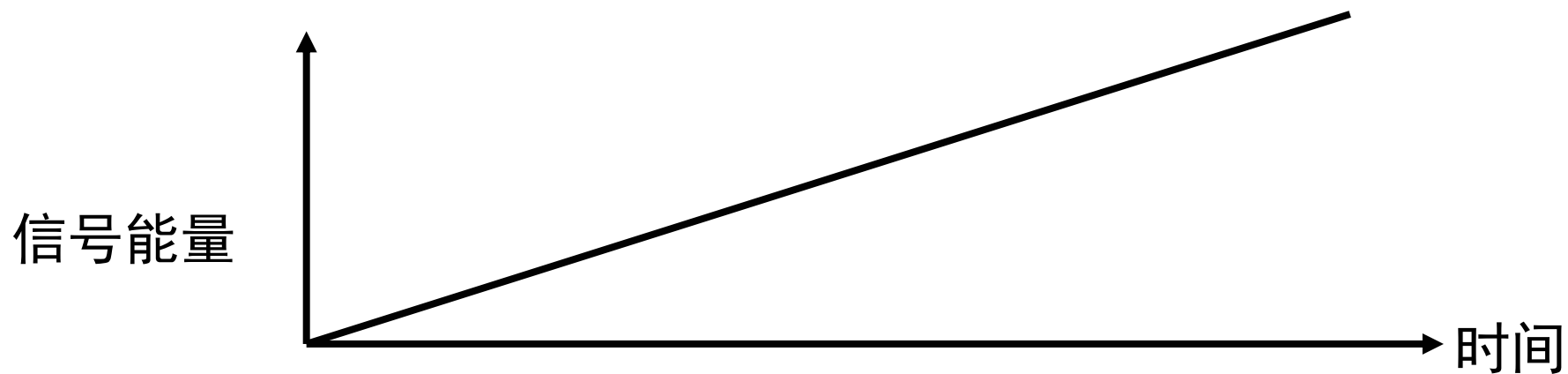




设计理念不合适：追求流量大、延迟短



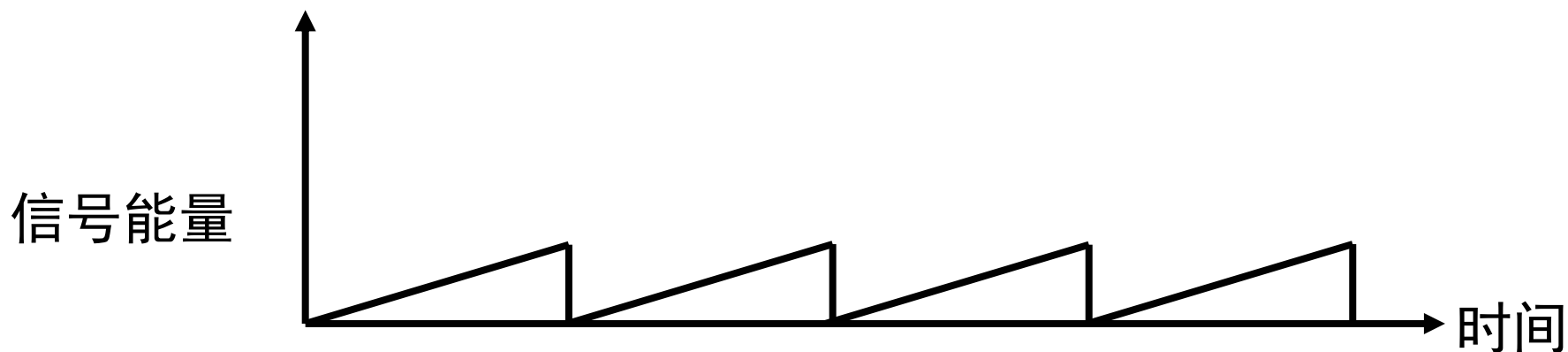
设计理念不合适：追求流量大、延迟短





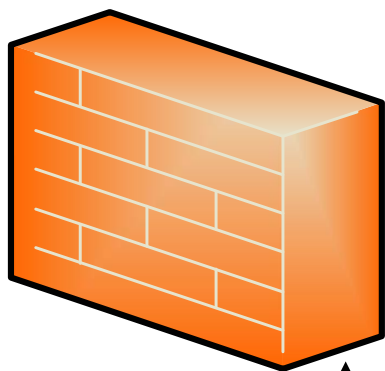
设计理念不合适：追求流量大、延迟短

发送太快就没有时间积攒能量

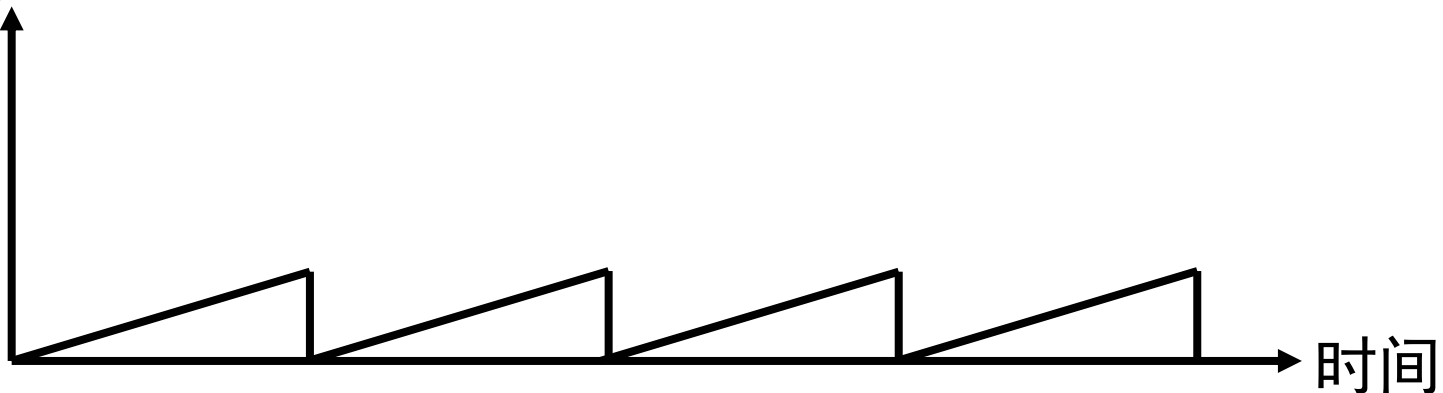




设计理念不合适：追求流量大、延迟短

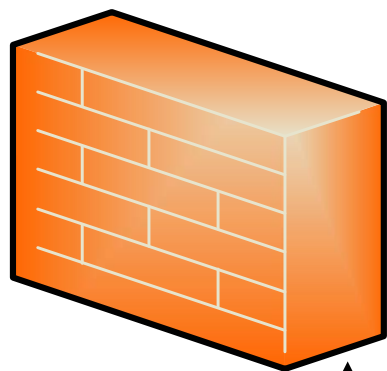


信号能量

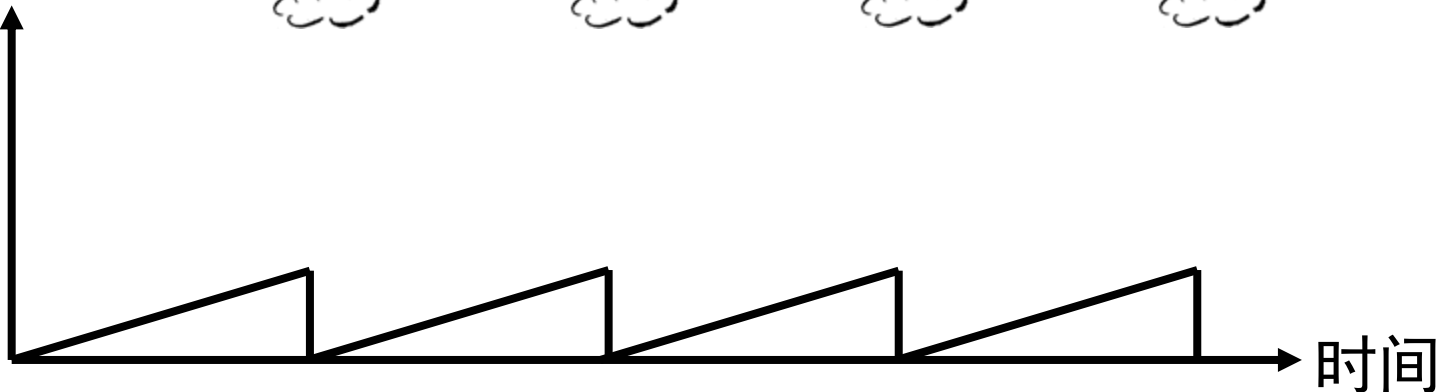




设计理念不合适：追求流量大、延迟短

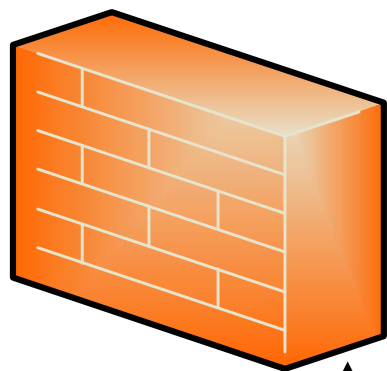


信号能量

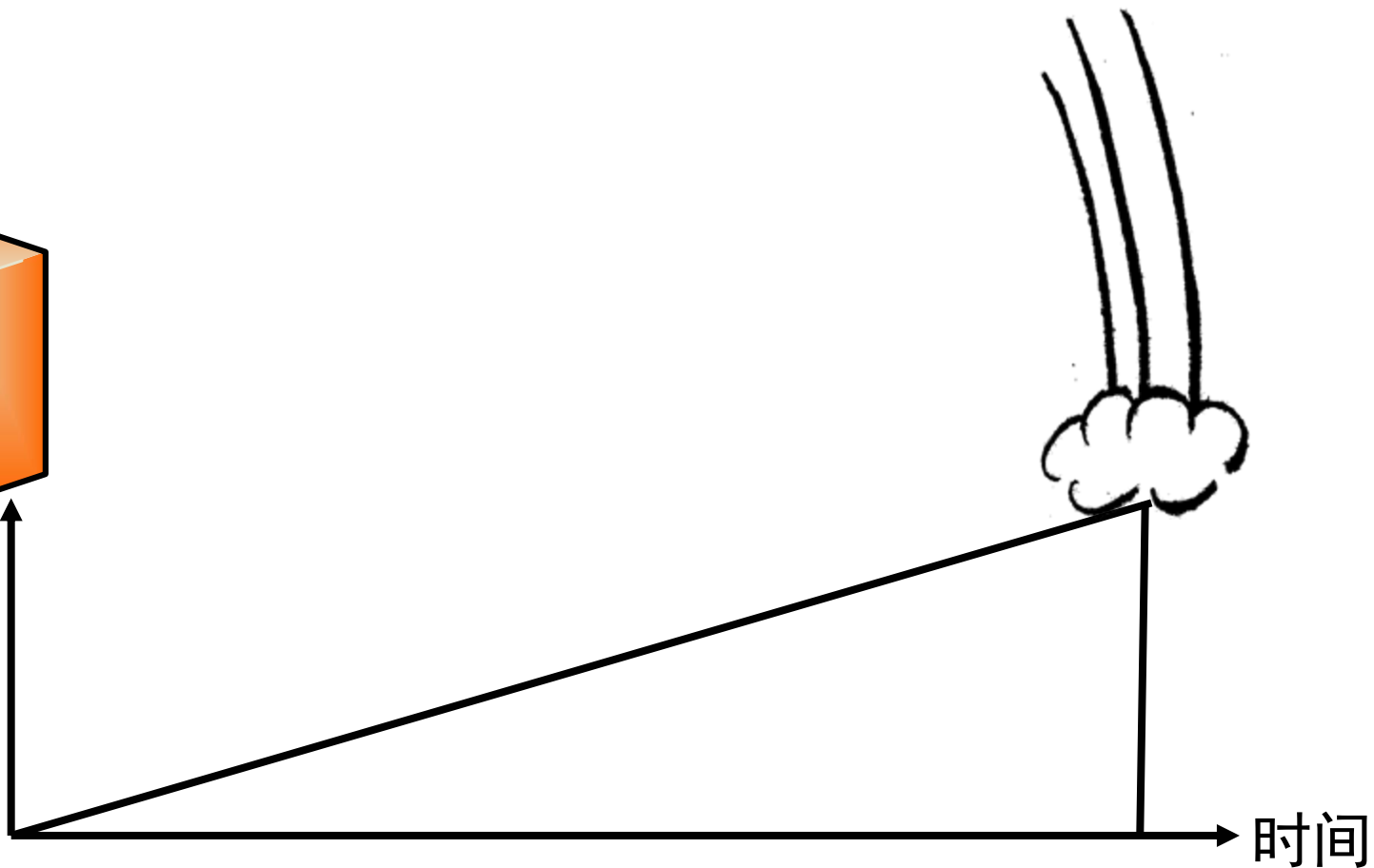




设计理念不合适：追求流量大、延迟短



信号能量





观察：实时通讯的数据流往往数据率低、恒定不变

一个典型的通讯连接：

100~200 比特/包, 10~1 包/秒



观察：实时通讯的数据流往往数据率低、恒定不变

一个典型的通讯连接：

100~200 比特/包, 10~1 包/秒

信息论：

低数据率 → 高可靠性



观察：实时通讯的数据流往往数据率低、恒定不变

一个典型的通讯连接：

100~200 比特/包, 10~1 包/秒

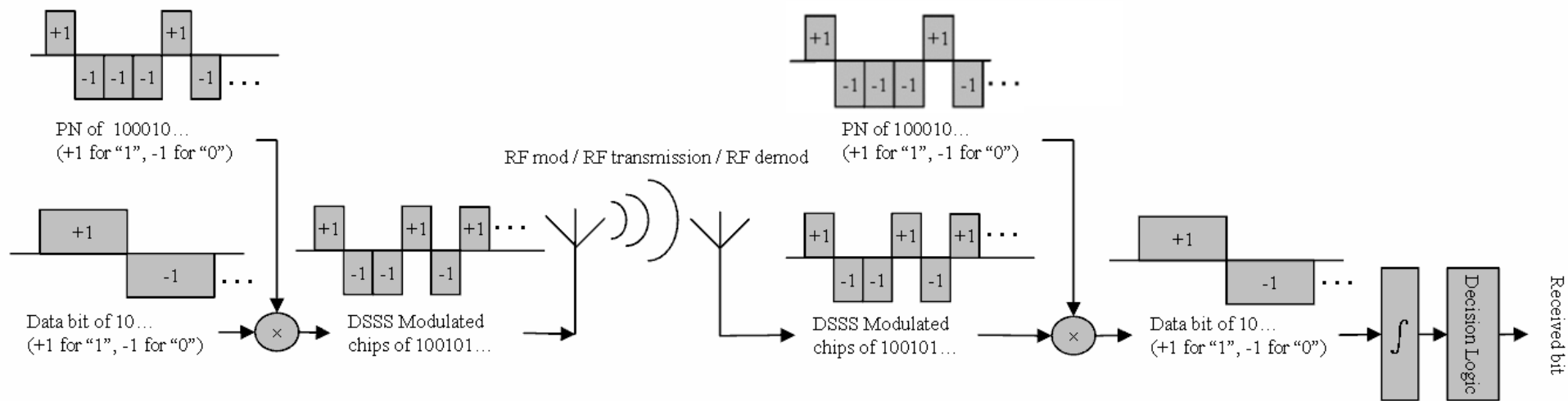
信息论：

低数据率 → 高可靠性

直接扩频（DSSS）技术：

低数据率 ↔ 高可靠性

DSSS简介

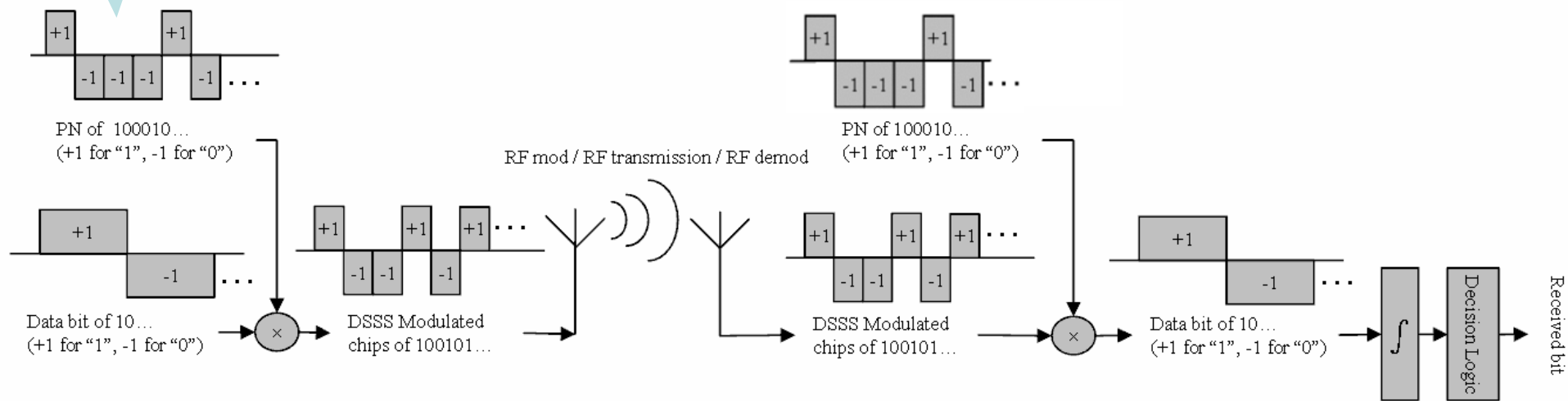


伪噪声序列
(PN) 流,

亦称为“切片
流”,

切片率为: R_c .

DSSS简介

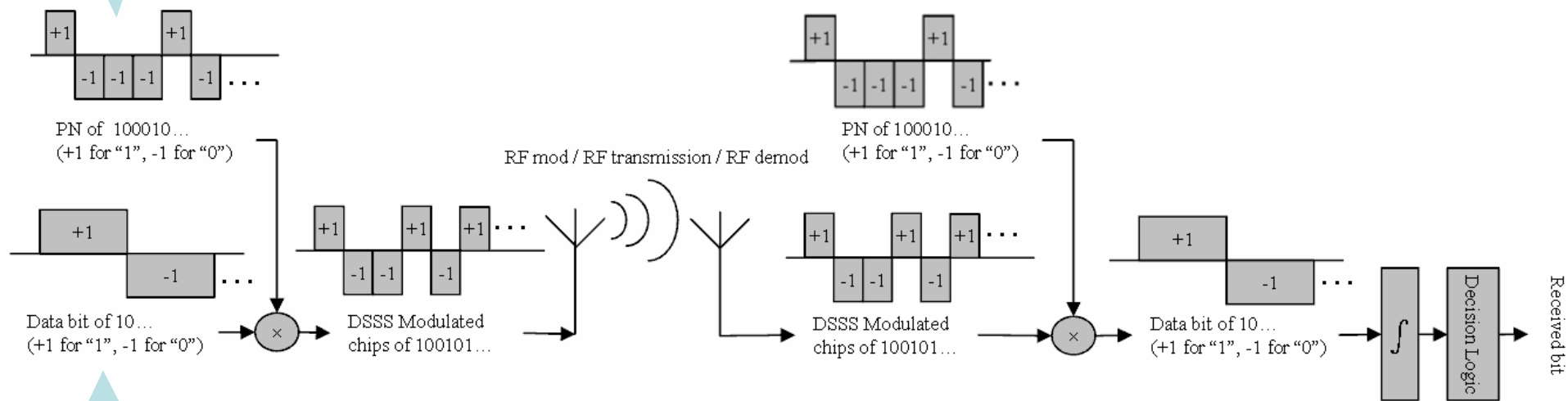


伪噪声序列
(PN) 流,

亦称为“切片
流”,

切片率为: R_c .

DSSS简介



数据流,
比特率:

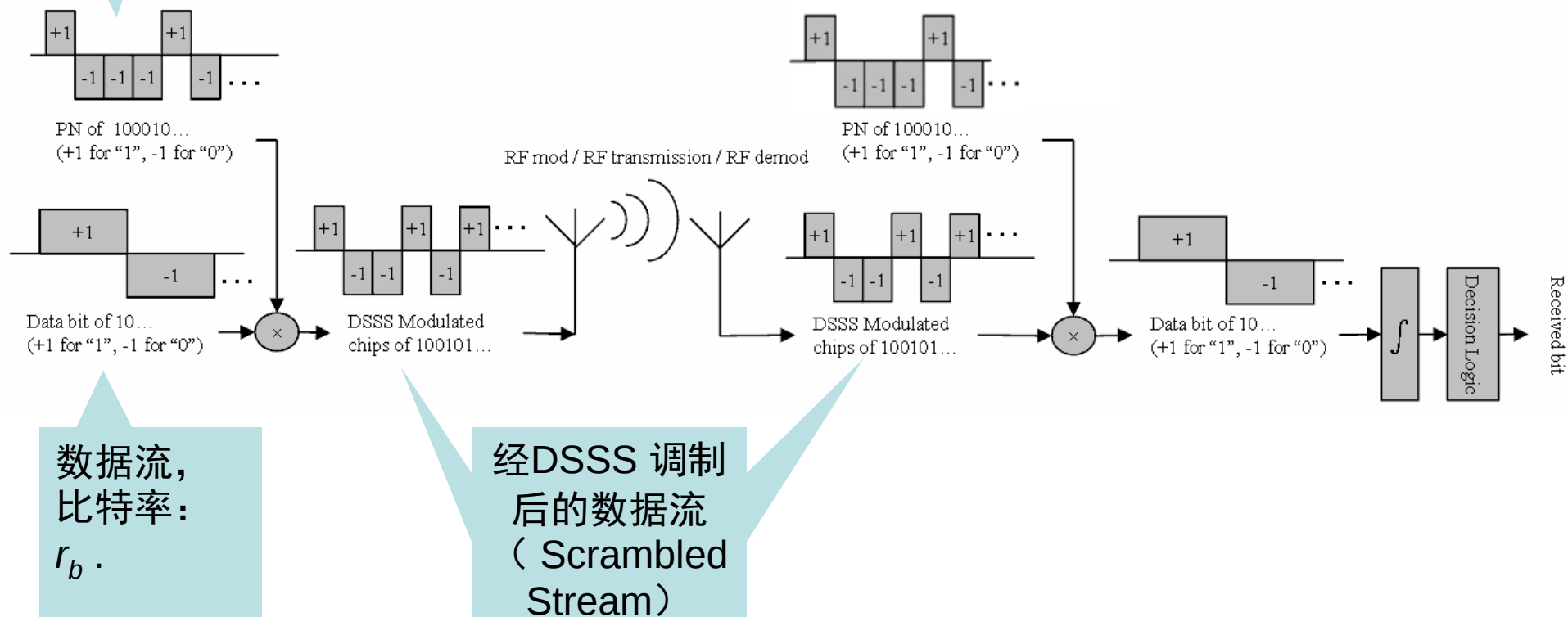
r_b .

DSSS简介

伪噪声序列
(PN) 流,

亦称为“切片
流”,

切片率为: R_c .



DSSS简介

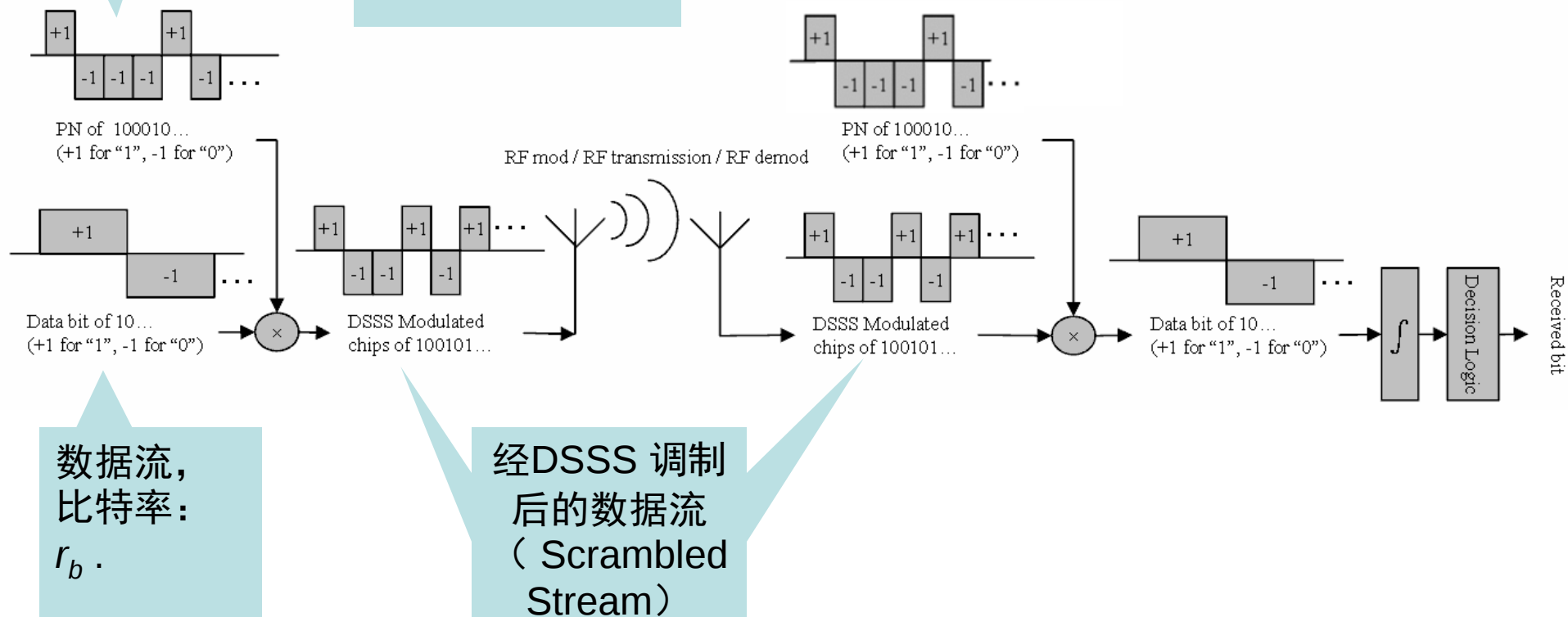
伪噪声序列
(PN) 流,

亦称为“切片
流”,

切片率为: R_c .

定义: 处理增益

$$g := R_c / r_b.$$



DSSS简介

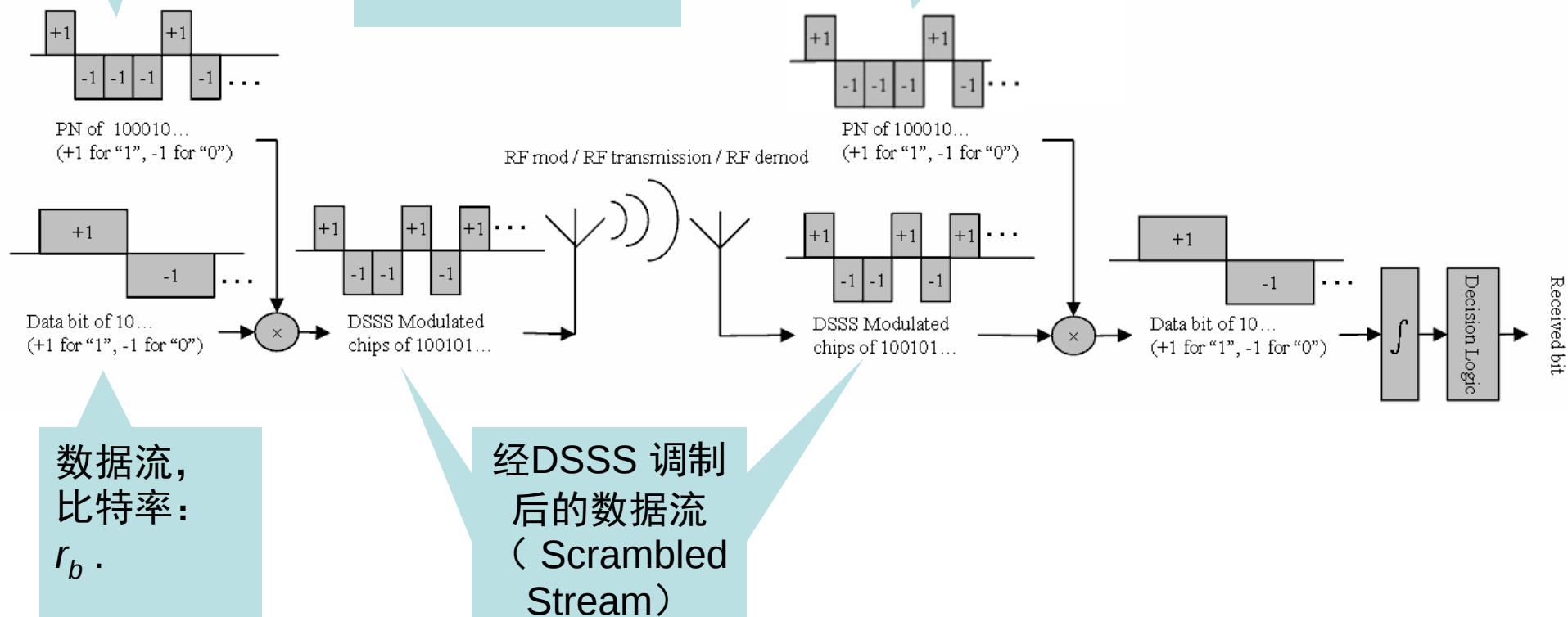
伪噪声序列
(PN) 流,

亦称为“切片
流”,

切片率为: R_c .

定义: 处理增益
 $g := R_c / r_b$.

相同的PN



DSSS简介

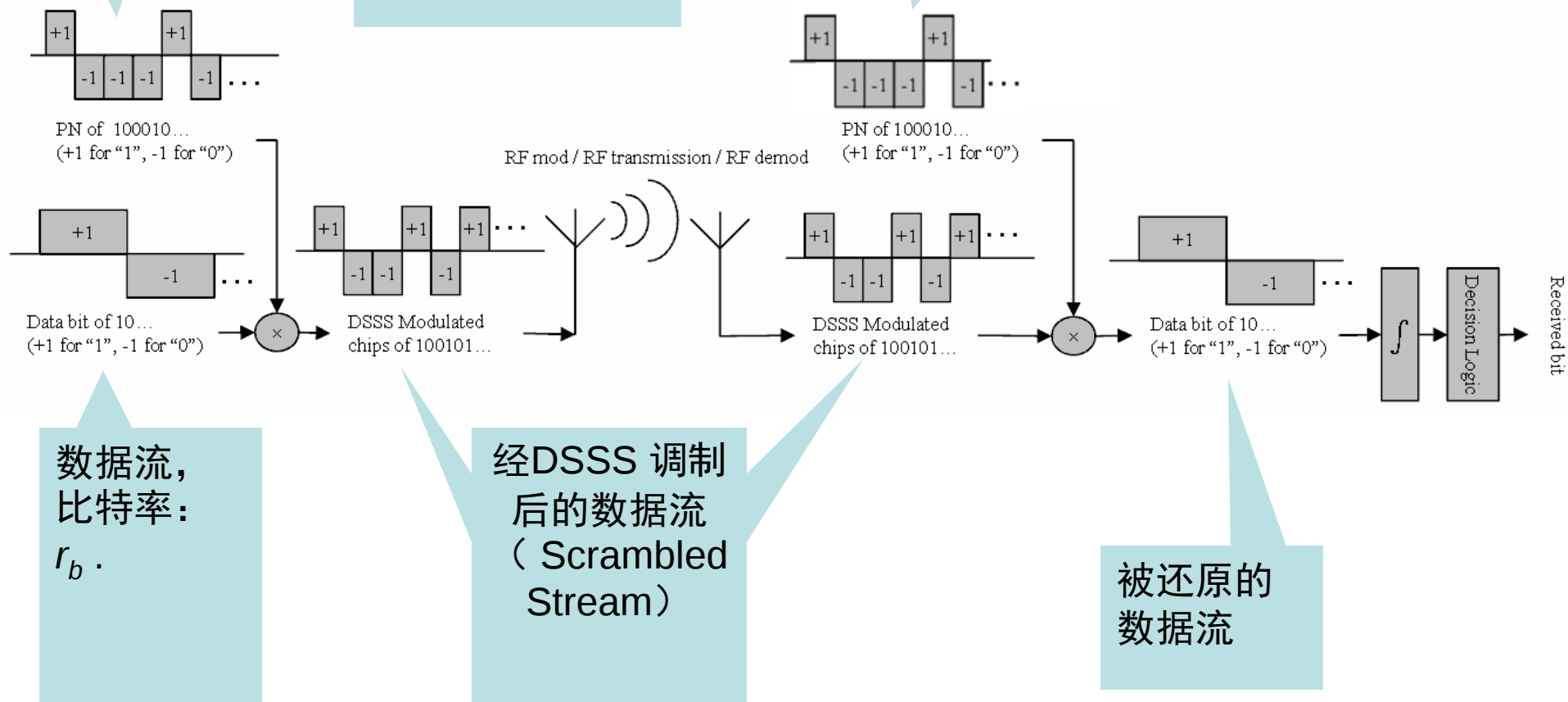
伪噪声序列
(PN) 流,

亦称为“切片
流”,

切片率为: R_c .

定义: 处理增益
 $g := R_c / r_b$.

相同的PN



DSSS简介

伪噪声序列
(PN) 流,

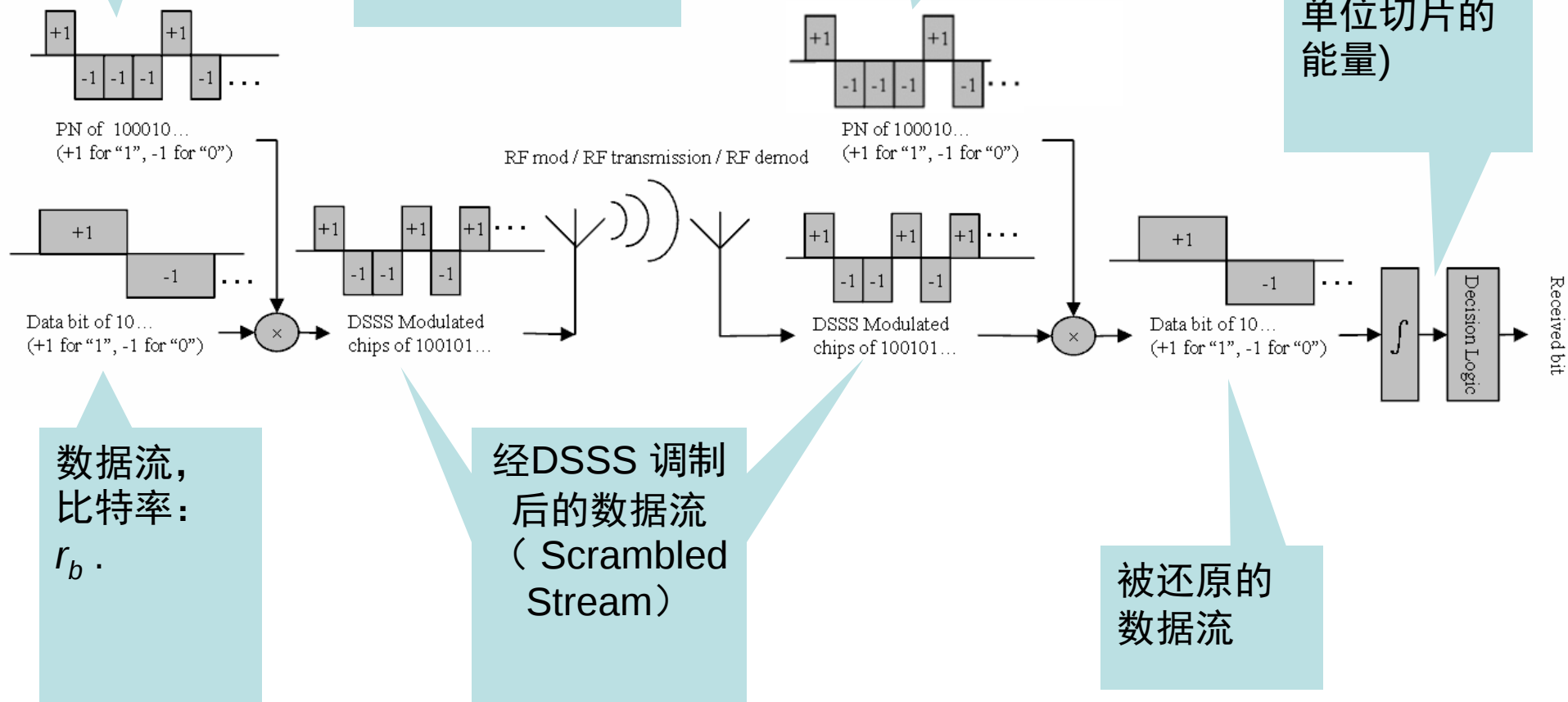
亦称为“切片
流”,

切片率为: R_c .

定义: **处理增益**
 $g := R_c / r_b$.

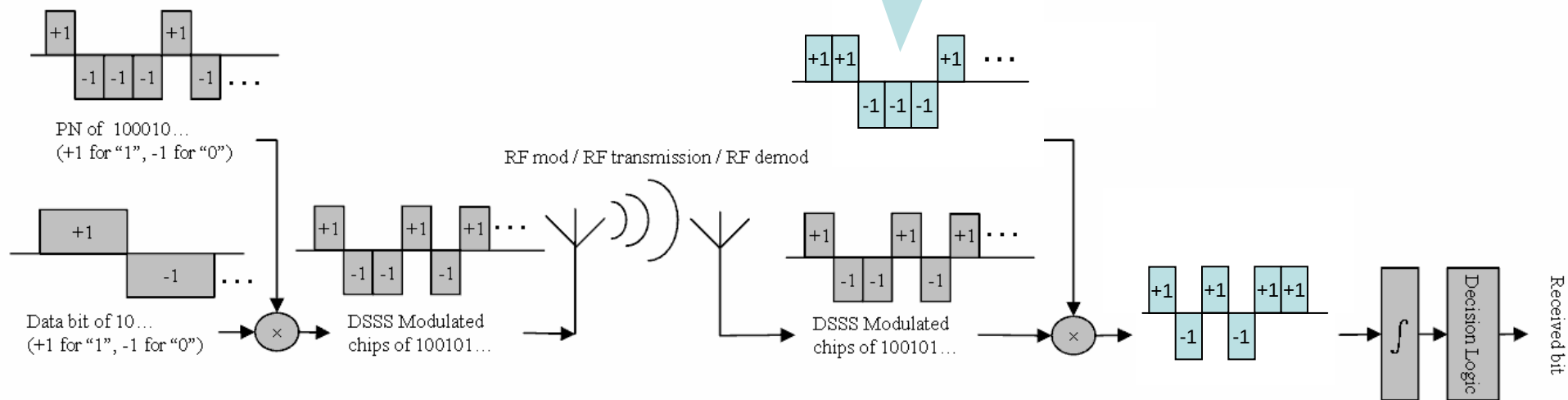
相同的PN

对每一个比
特进行积分
 $= gE_c$ (E_c 是
单位切片的
能量)



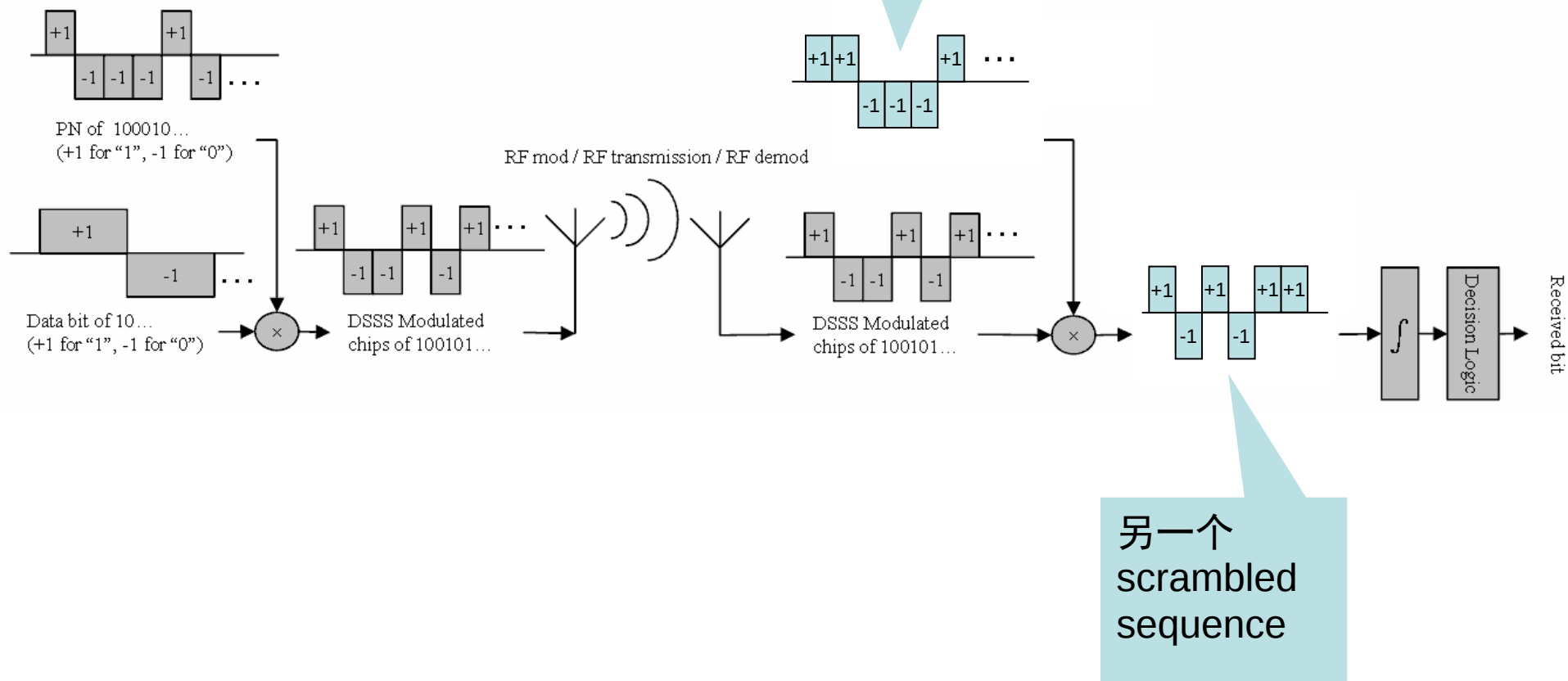
DSSS简介

如果使用了不同的
PN



DSSS简介

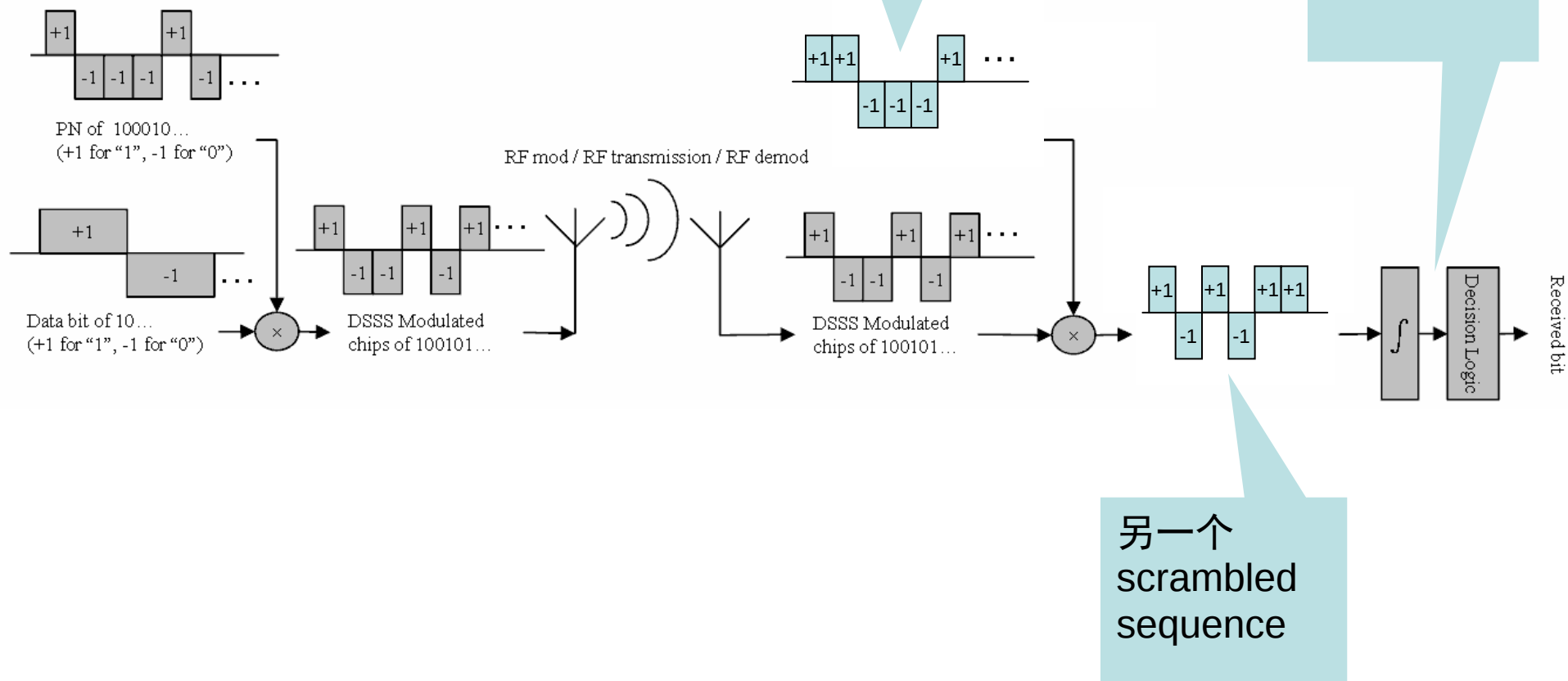
如果使用了不同的
PN



DSSS简介

如果使用了不同的
PN

积分 = 高
斯噪声



观察

比特出错
率

处理增益

$$\mathcal{P}_{ber} \leq \exp \left(- \frac{g P_u}{J + \sum_{i=1, i \neq u}^{\Xi} P_i + \sum_{h=1}^H A_h + P_u} \right)$$

- DSSS 技术:

增大处理增益 $g \Leftrightarrow$ 减小数据率 $\Leftrightarrow$ 降低比特出错率 (更可靠)



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

DSSS比特出错率上限



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

比特出错
率

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

DSSS比特出错率上限



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

比特出错
率

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

常数

DSSS比特出错率上限



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

比特出错率

处理增益

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

常数

DSSS比特出错率上限



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

比特出错率

处理增益

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

常数

比特率

DSSS比特出错率上限



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

比特出错率

处理增益

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

常数

比特率

DSSS比特出错率上限
降低数据率 r_b



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

比特出错率

处理增益

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

常数

比特率

DSSS比特出错率上限

降低数据率 $r_b \leftrightarrow$ 提高处理增益 g



观察：通过DSSS，我们可以充分利用实时通信低数据率的特点，以达到高可靠性

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$

Diagram annotations:

- 比特出错率 (Bit Error Rate) points to P_{BER}
- 处理增益 (Processing Gain) points to g
- 常数 (Constant) points to K
- 比特率 (Bit Rate) points to r_b

DSSS比特出错率上限

降低数据率 $r_b \leftrightarrow$ 提高处理增益 $g \leftrightarrow$ 降低比特出错率

P_{BER} (提高可靠性)



关键问题：面对恶劣的无线信道条件，怎样最大化可靠性？



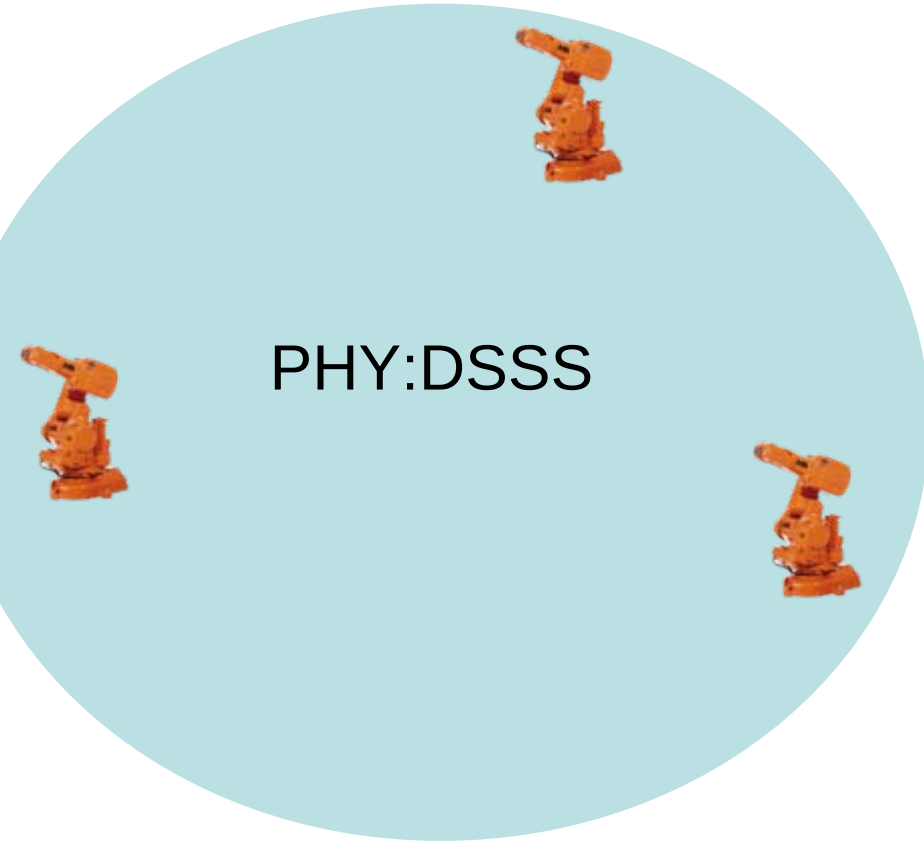
关键问题：面对恶劣的无线信道条件，怎样最大化可靠性？

答案：使用DSSS，将数据率 r_b 减至最慢（亦即将处理增益 g 升至最高）。

$$P_{BER} \leq \exp(-gK) = \exp\left(-\frac{K}{r_b}\right)$$



设计思路

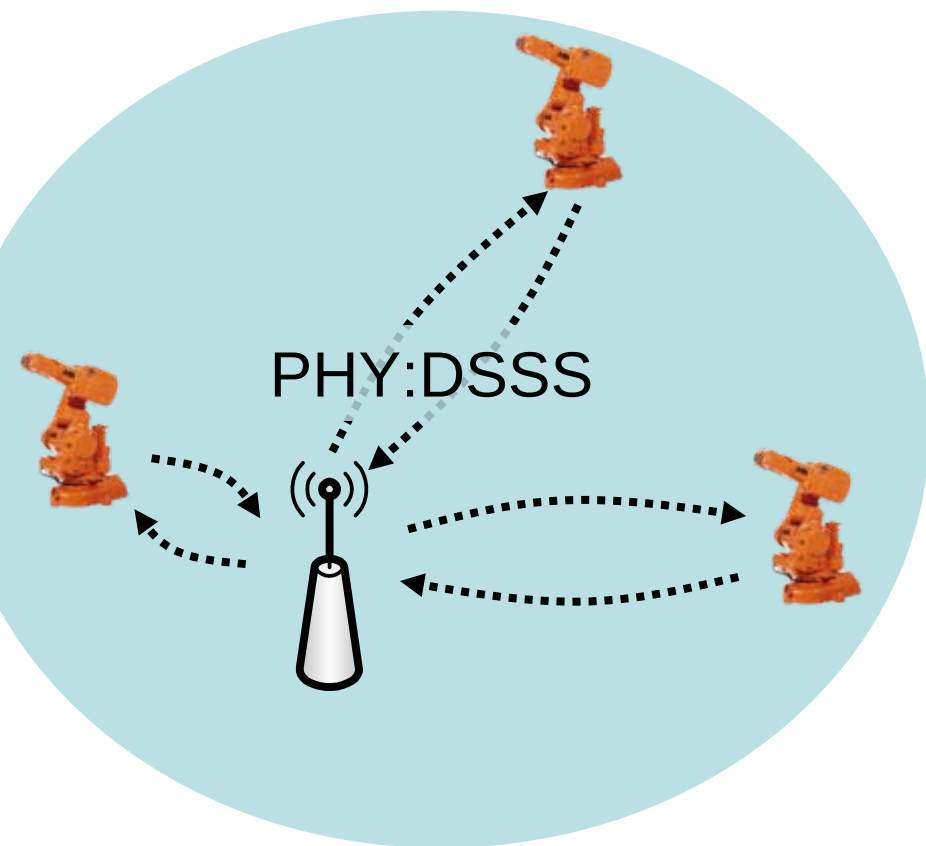


通过DSSS利用低数据率来达到
高可靠性



观察：工业界偏好集中式（centralized）、单步（last-hop）的无线通信

集中式：简单经济

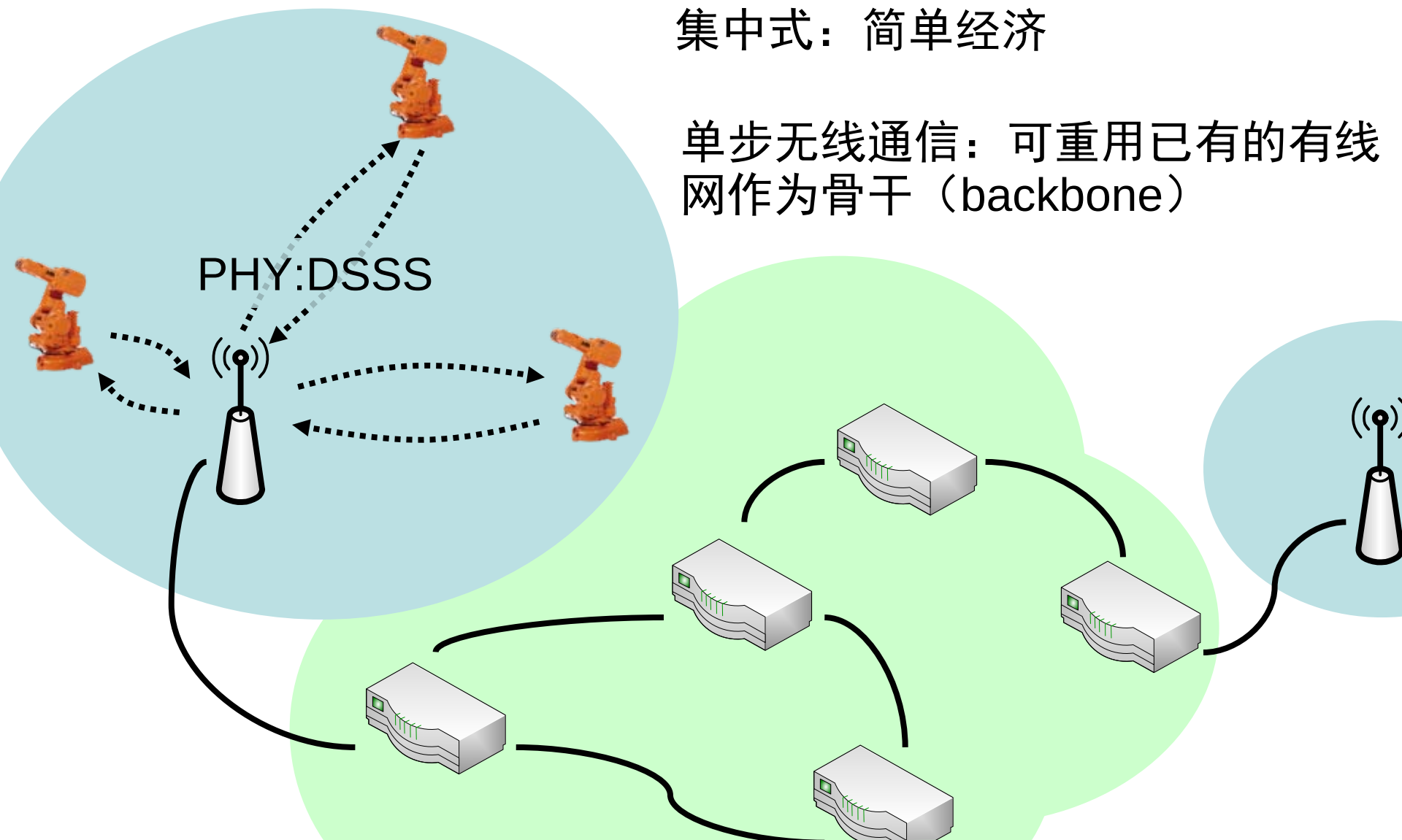




观察：工业界偏好集中式（centralized）、单步（last-hop）的无线通信

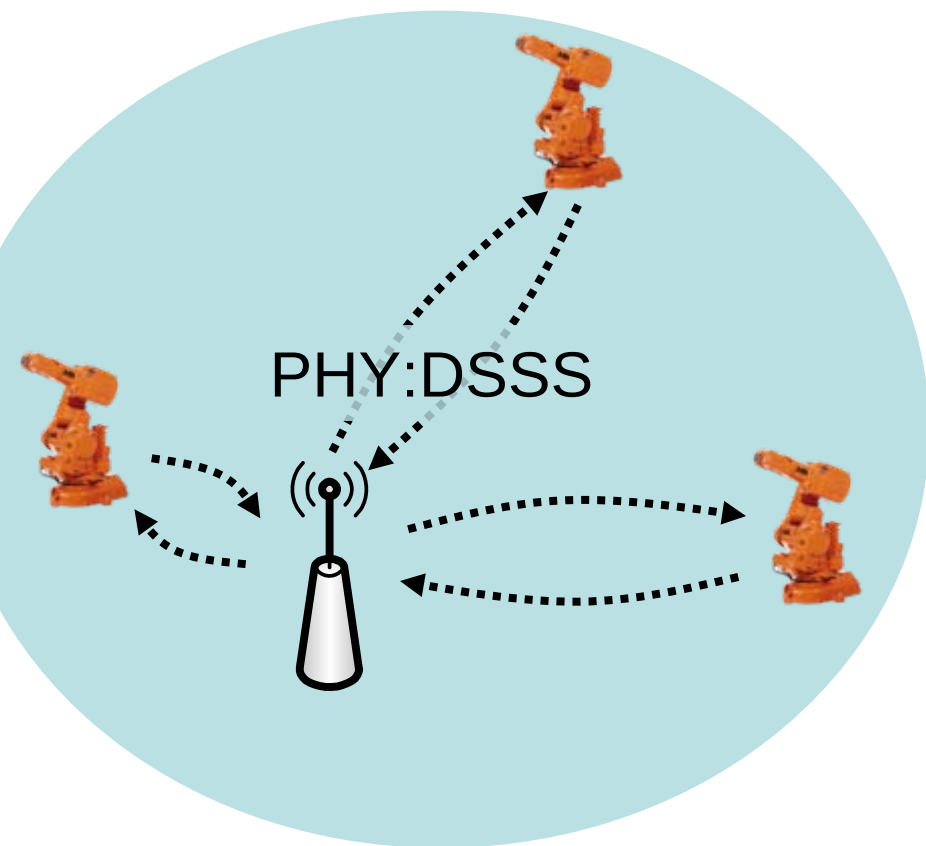
集中式：简单经济

单步无线通信：可重用已有的有线网作为骨干（backbone）





设计思路

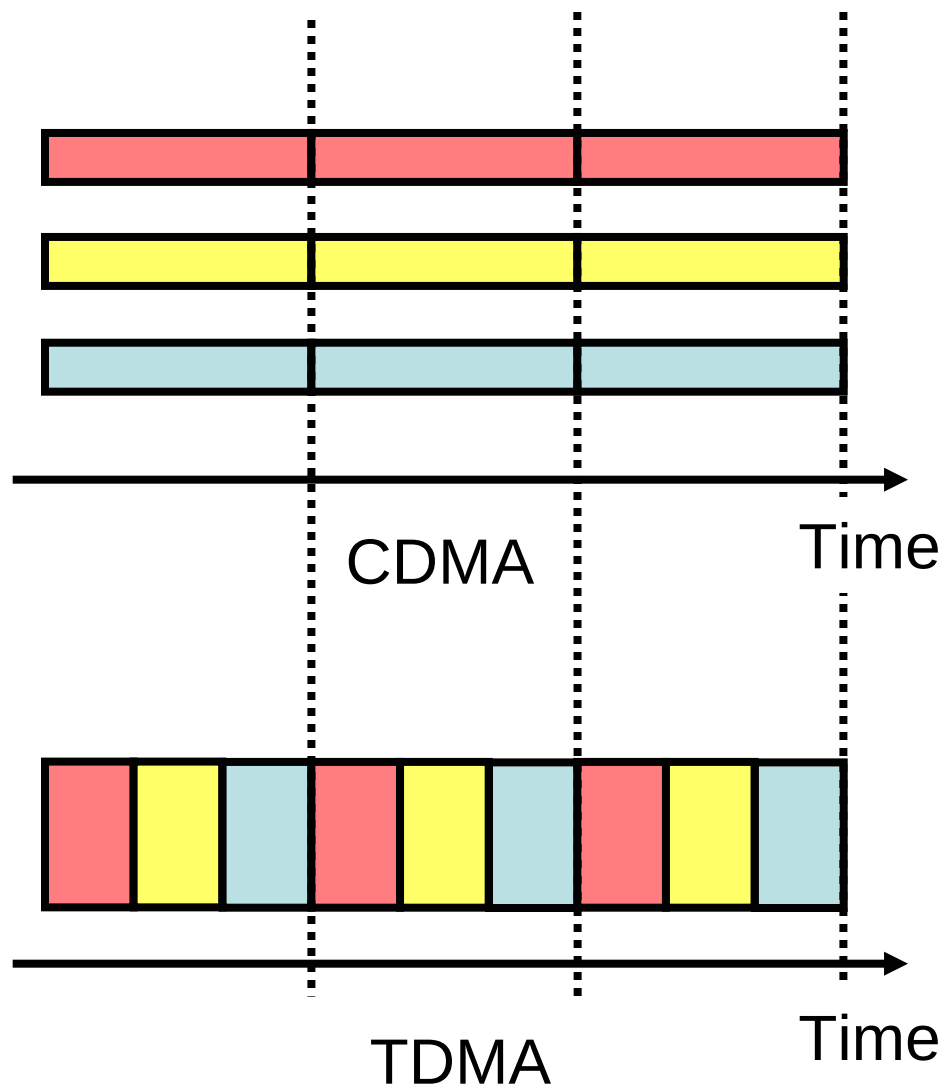


通过DSSS利用低数据率来达到
高可靠性

集中式无线局域网



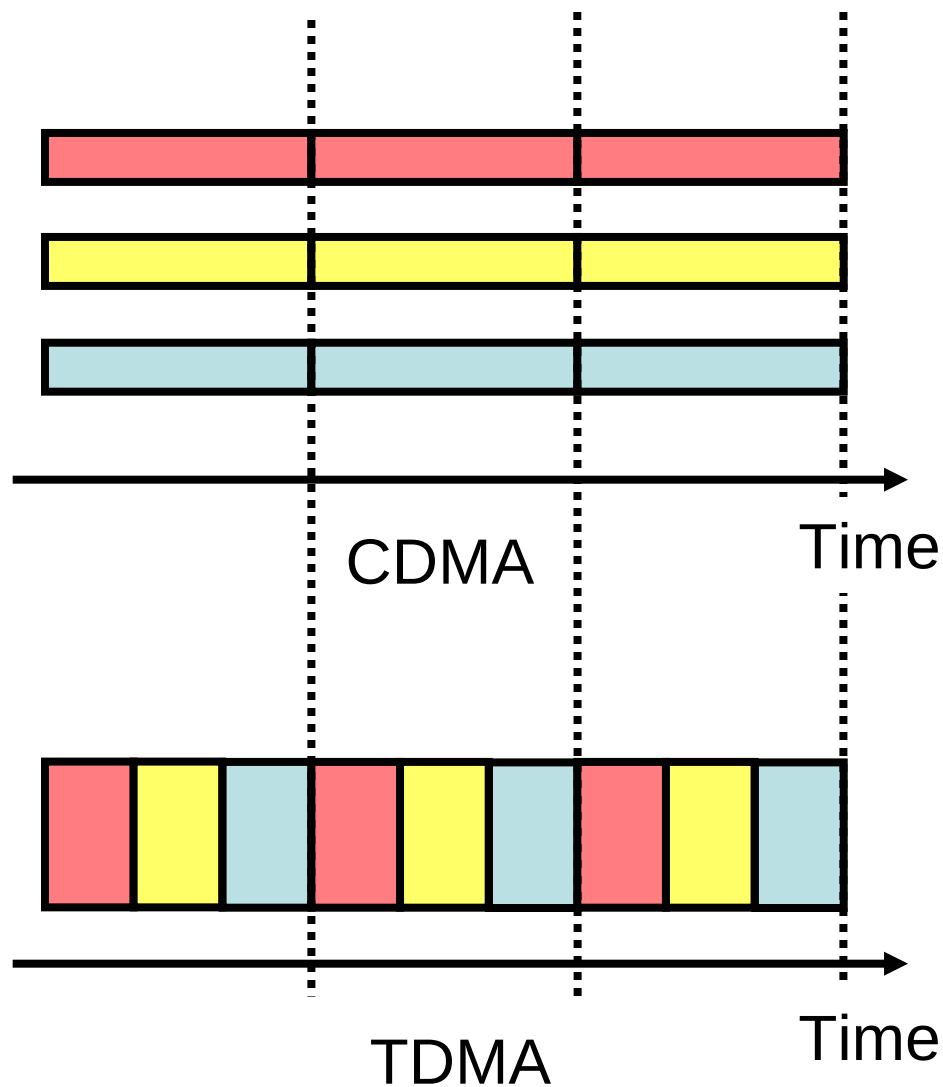
观察：CDMA优于TDMA（例如IEEE 802.11 PCF）





观察：CDMA优于TDMA（例如IEEE 802.11 PCF）

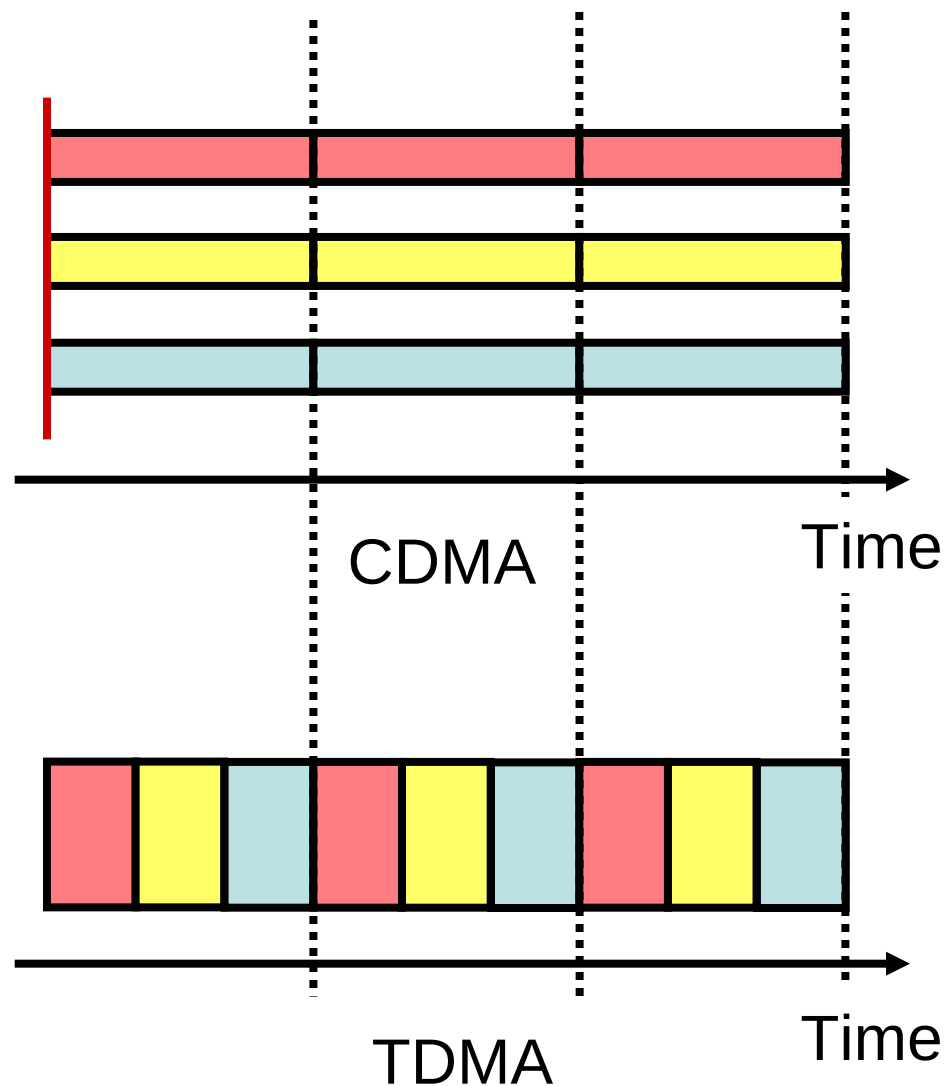
恶劣无线信道条件下附加开销（overhead）更小





观察：CDMA优于TDMA（例如IEEE 802.11 PCF）

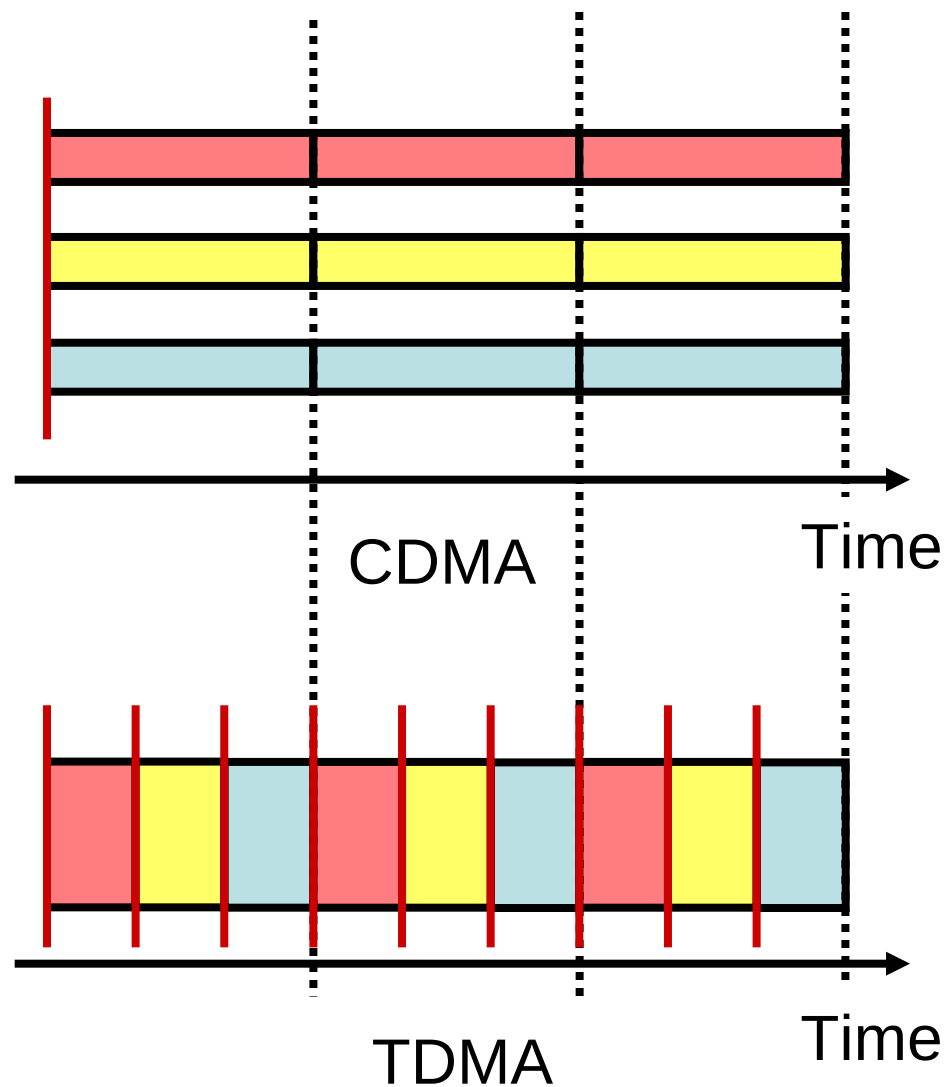
恶劣无线信道条件下附加开销（overhead）更小





观察：CDMA优于TDMA（例如IEEE 802.11 PCF）

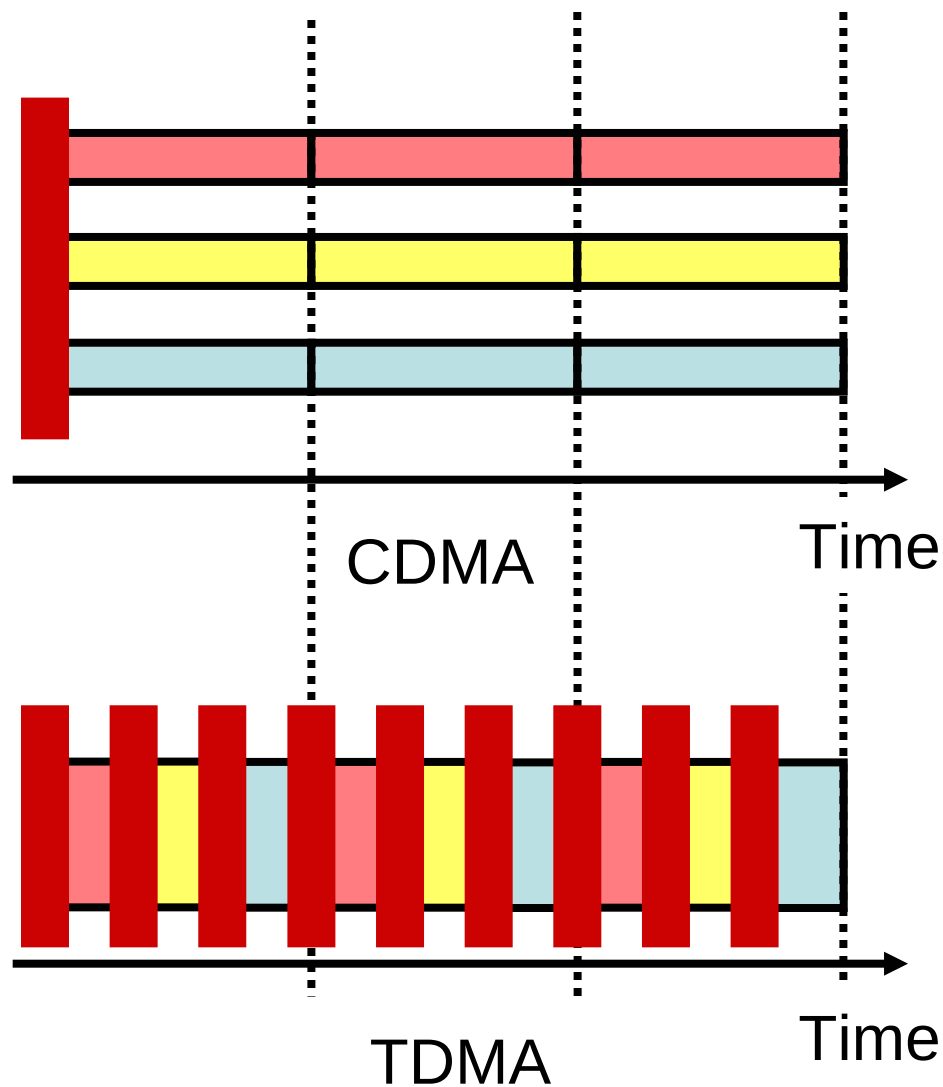
恶劣无线信道条件下附加开销（overhead）更小





观察：CDMA优于TDMA（例如IEEE 802.11 PCF）

恶劣无线信道条件下附加开销（overhead）更小

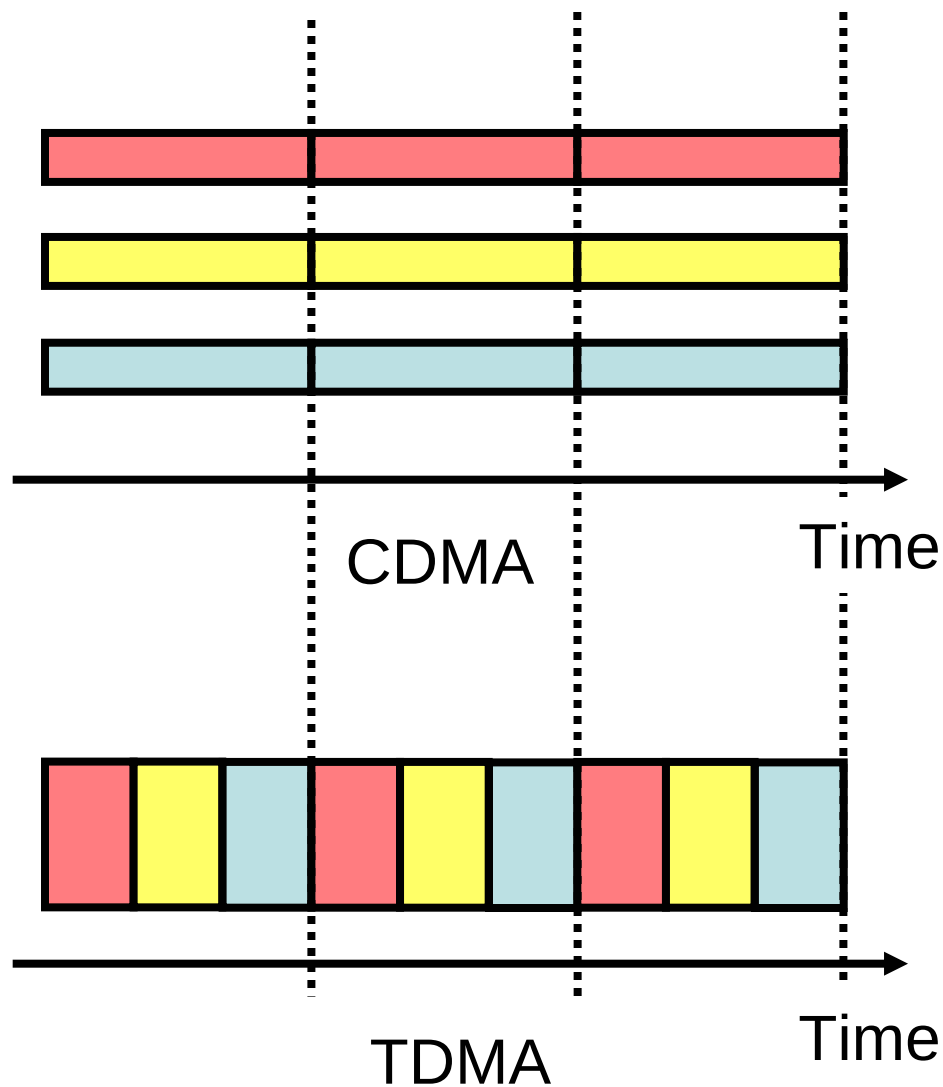




观察：CDMA优于TDMA（例如IEEE 802.11 PCF）

恶劣无线信道条件下附加开销（overhead）更小

容易调度



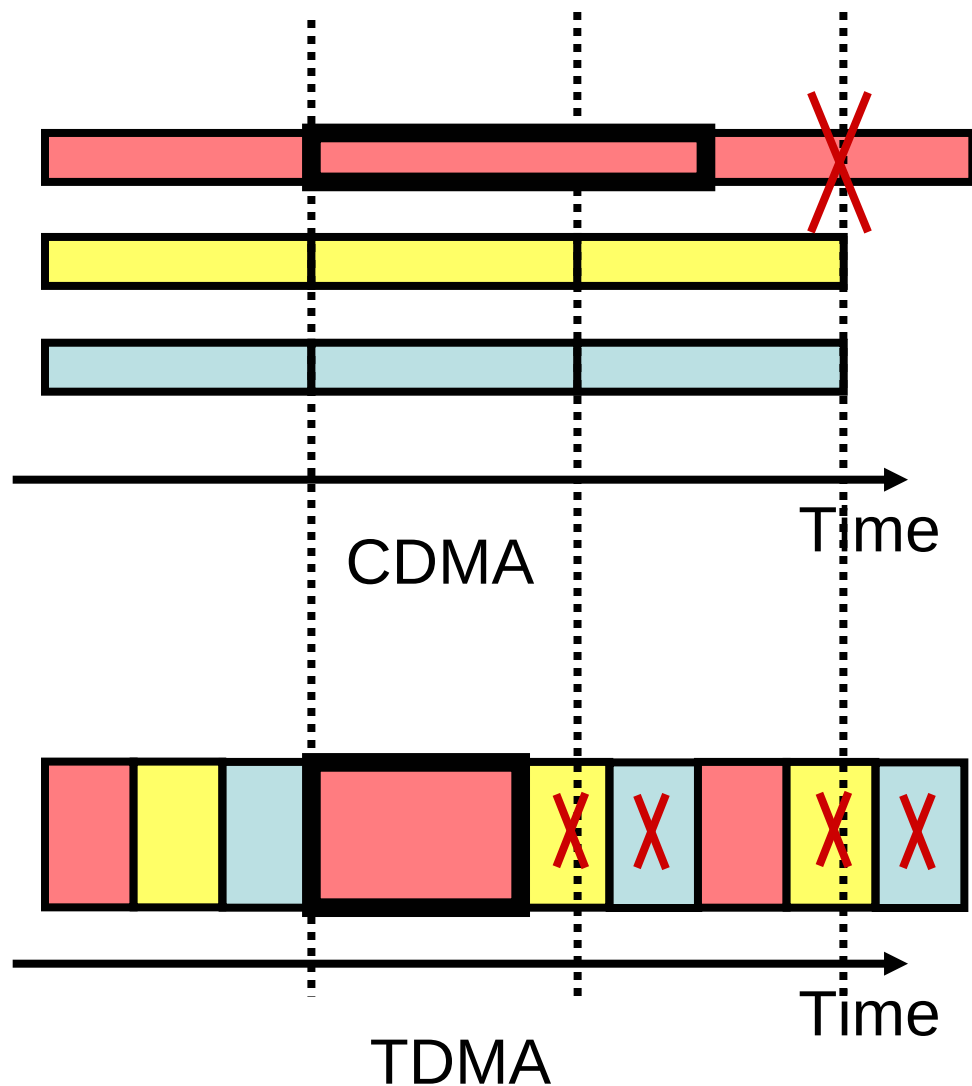


观察：CDMA优于TDMA（例如IEEE 802.11 PCF）

恶劣无线信道条件下附加开销（overhead）更小

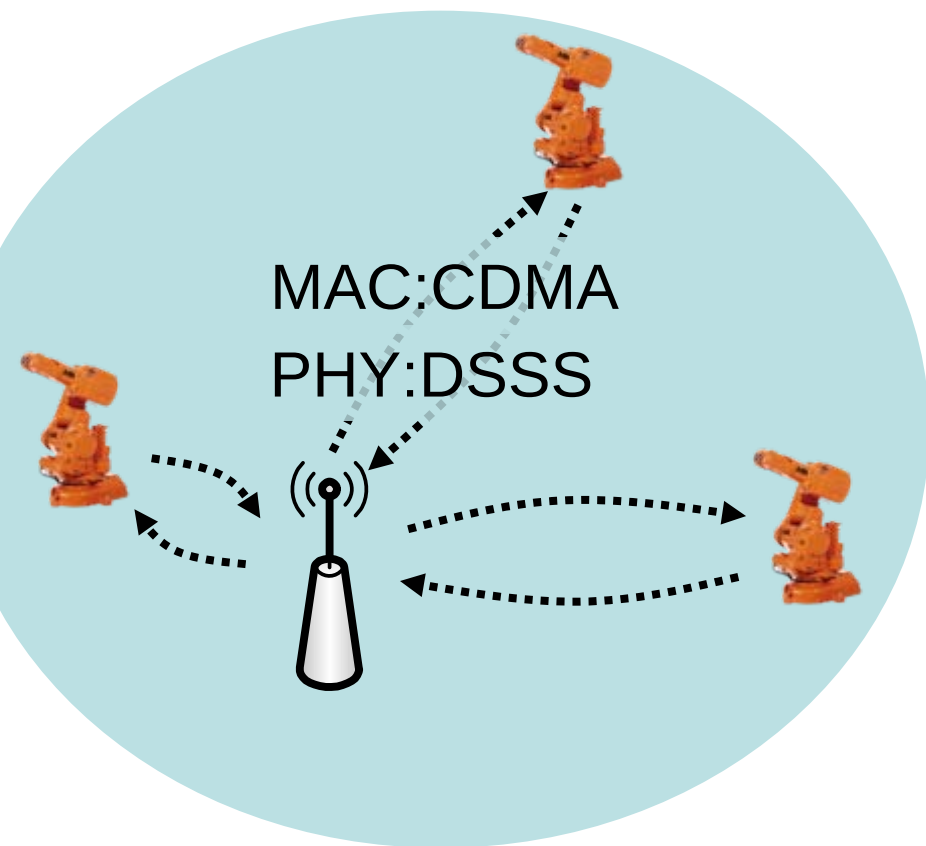
容易调度

封装性（isolation）好





设计思路



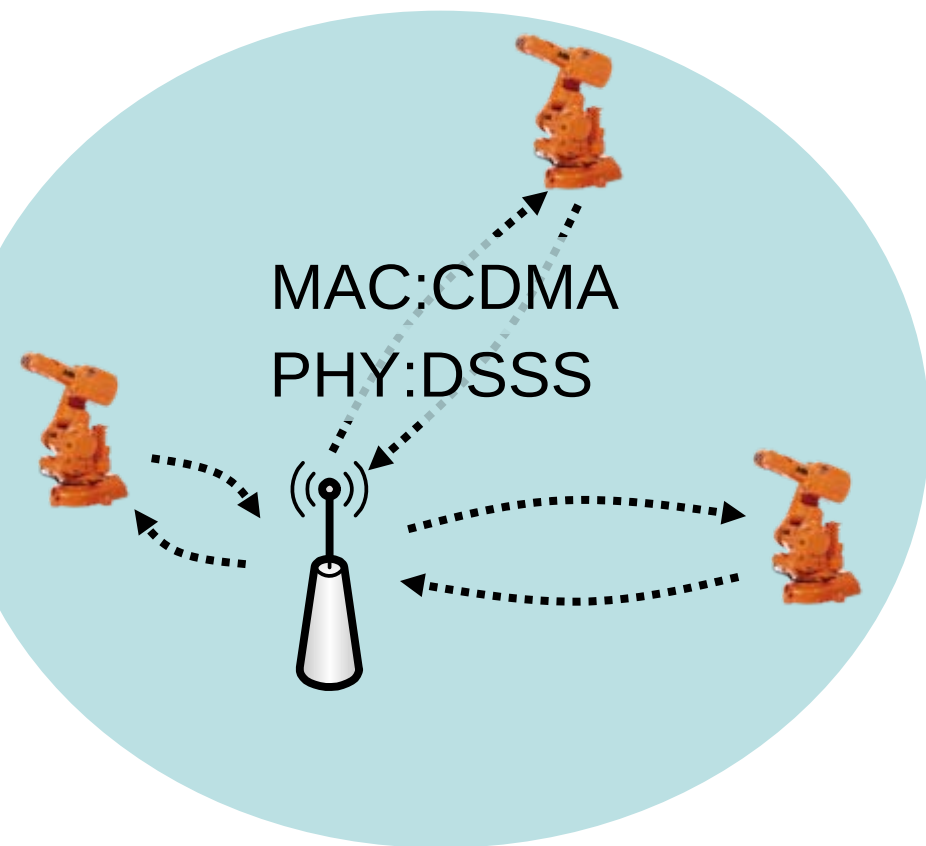
通过DSSS利用低数据率来达到高可靠性

集中式无线局域网

MAC层使用CDMA



设计思路总结 → 采用DSSS-CDMA手机网络模式！



通过DSSS利用低数据率来达到高可靠性

集中式无线局域网

MAC层使用CDMA



对比分析

采用典型的工业环境的无线信道模型 [Rappaport02]:

Table 1. Wireless Medium Model

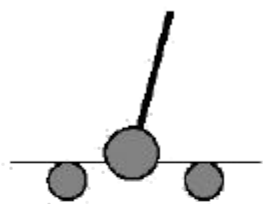
Large-scale path loss model	Log-normal shadowing model with $\beta = 4 \sim 6, \sigma = 6.8\text{dB}$ *
Small-scale fading model	Rayleigh
Multipath max excess delay	90.909nsec
Additive White Gaussian Noise [†]	Spectral density = -174dBm/Hz

* β is the path loss exponent, σ is the log-normal standard deviation.

† Typically refers to thermal noise.



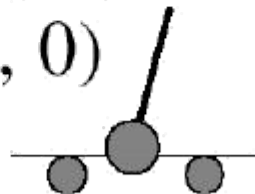
仿真实验演示说明DSSS-CDMA实时无线通讯可以
耐受IEEE 802.11b所不能耐受的无线干扰。



IP2 at $(-3, 2)$

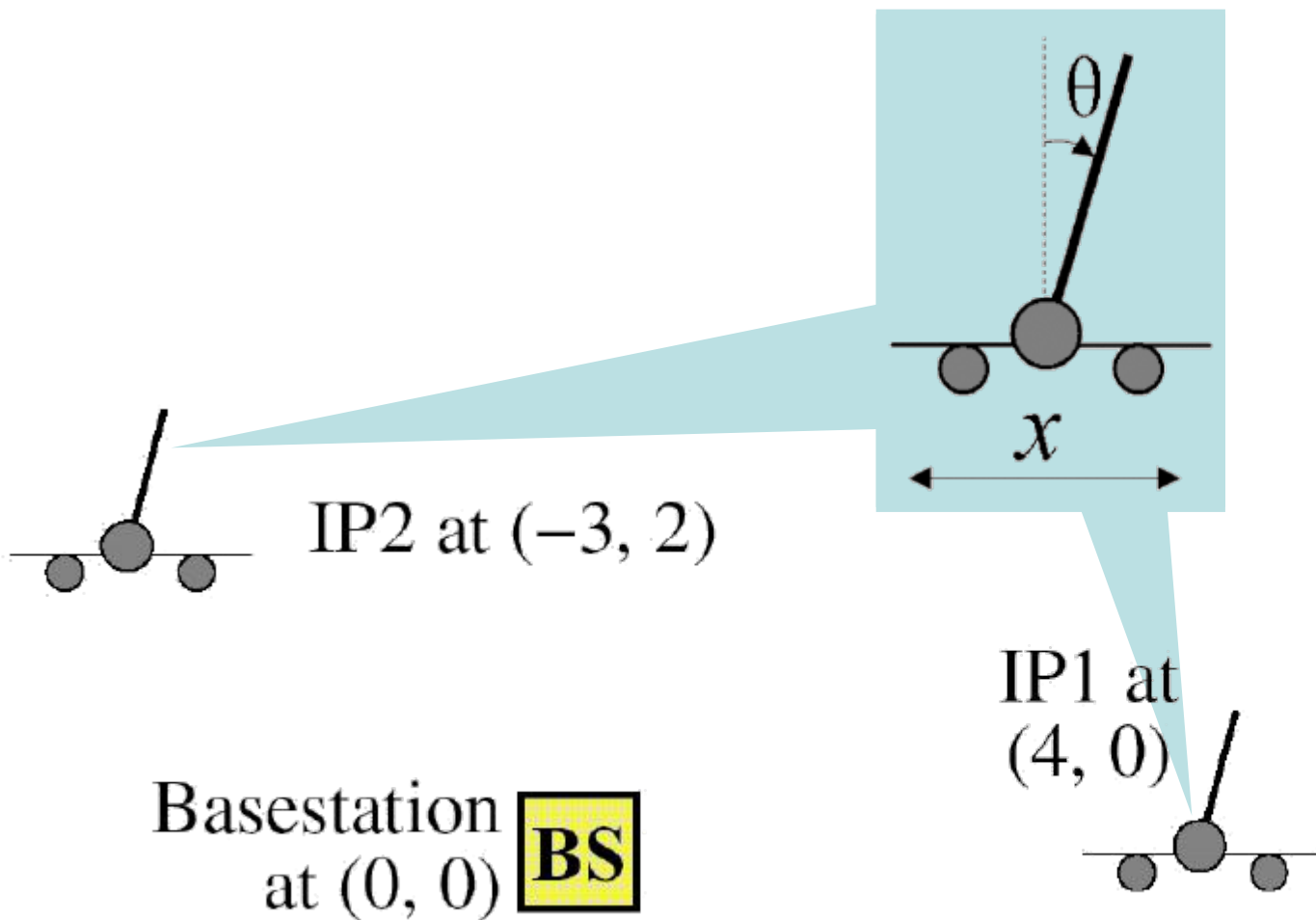
Basestation
at $(0, 0)$ **BS**

IP1 at
 $(4, 0)$





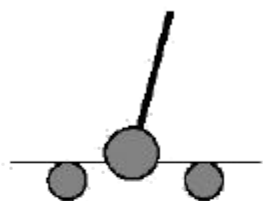
仿真实验演示说明DSSS-CDMA实时无线通讯可以
耐受IEEE 802.11b所不能耐受的无线干扰。





仿真实验演示说明DSSS-CDMA实时无线通讯可以
耐受IEEE 802.11b所不能耐受的无线干扰。

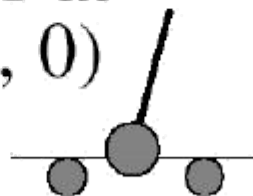
采用了典型的工业环境下的无线信道模型



IP2 at $(-3, 2)$

Basestation
at $(0, 0)$ **BS**

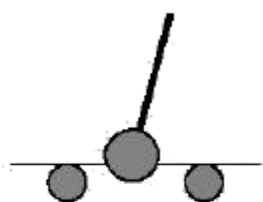
IP1 at
 $(4, 0)$





仿真实验演示说明DSSS-CDMA实时无线通讯可以
耐受IEEE 802.11b所不能耐受的无线干扰。

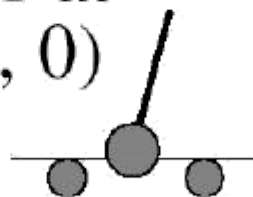
采用了典型的工业环境下的无线信道模型



IP2 at $(-3, 2)$

Basestation
at $(0, 0)$ **BS**

IP1 at
 $(4, 0)$



external RF
interference
source at $(7, 0)$



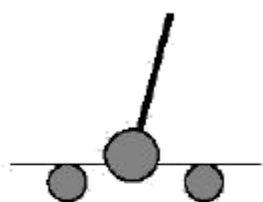


仿真实验演示说明DSSS-CDMA实时无线通讯可以
耐受IEEE 802.11b所不能耐受的无线干扰。

对比：

DSSS-CDMA：最低数据率

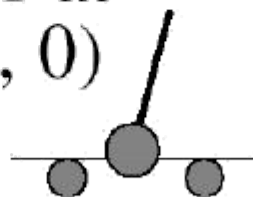
IEEE 802.11b：尽多次重发



IP2 at $(-3, 2)$

Basestation
at $(0, 0)$ **BS**

IP1 at
 $(4, 0)$

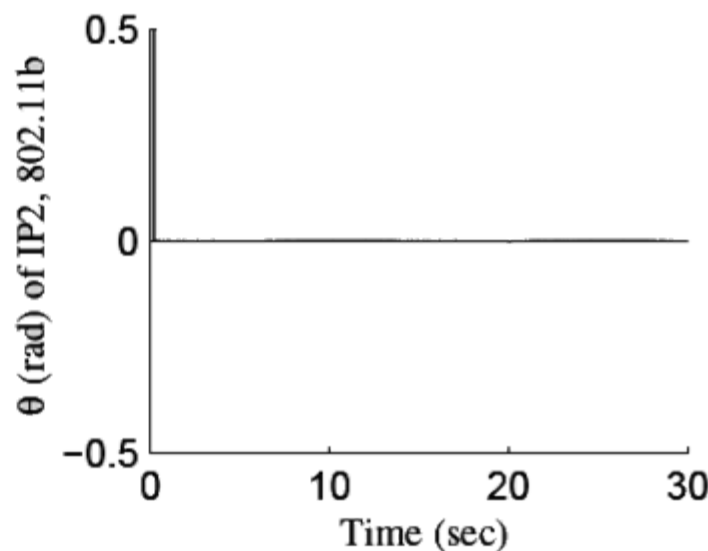
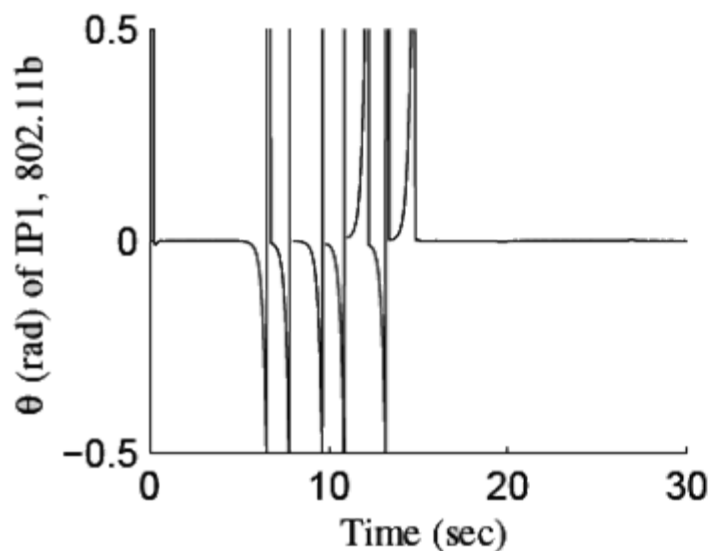
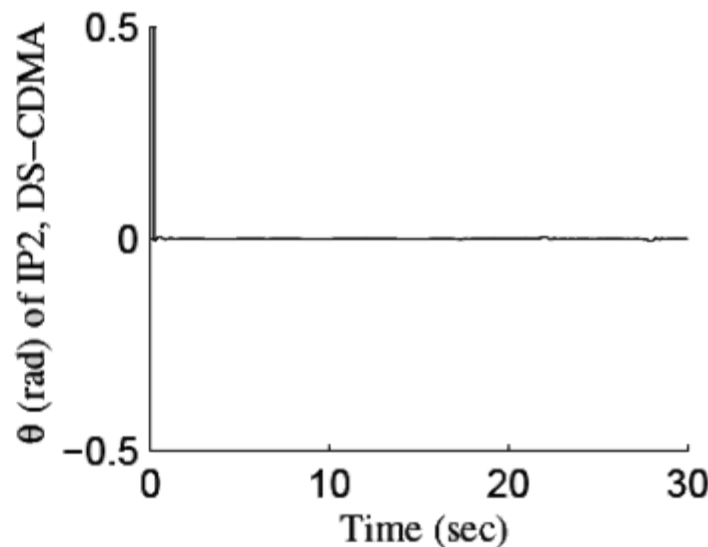
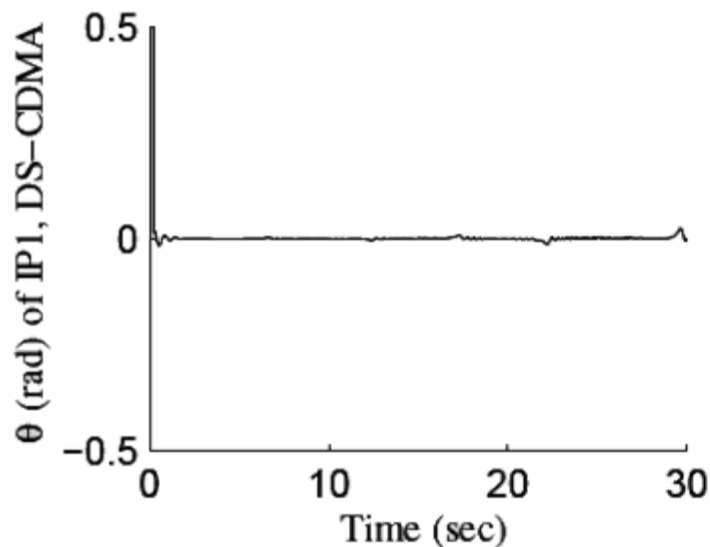


external RF
interference
source at $(7, 0)$





仿真实验演示说明DSSS-CDMA实时无线通讯可以耐受IEEE 802.11b所不能耐受的无线干扰。





蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.11a/b 更可靠

蒙特-卡洛仿真环境设置

20m x 20m 房间，基站居中

n ($n = 1, \dots, 100$) 台客户机，随机分布

对每个 n 运行200次仿真

典型工业环境下的无线信道模型

怎样提高可靠性？

DSSS-CDMA：最低数据率

IEEE 802.11a/b：尽多次地重发



蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.11a/b更可靠

802.11:

- 使用最可靠的模式：
 - 802.11b (DSSS): 1, 2, 5.5, 11Mbps
 - 802.11a (OFDM): 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54Mbps
- 采用802.11集中模式（PCF），并用尽量多的重发来提高可靠性，即便信道恶化也不间断。

DSSS-CDMA

- 采用最低数据率（亦即最大处理增益 g ）来提高可靠性
- 信道变坏时不间断通信



蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.11a/b 更可靠

Table 2. Physical Layer Settings for Comparisons

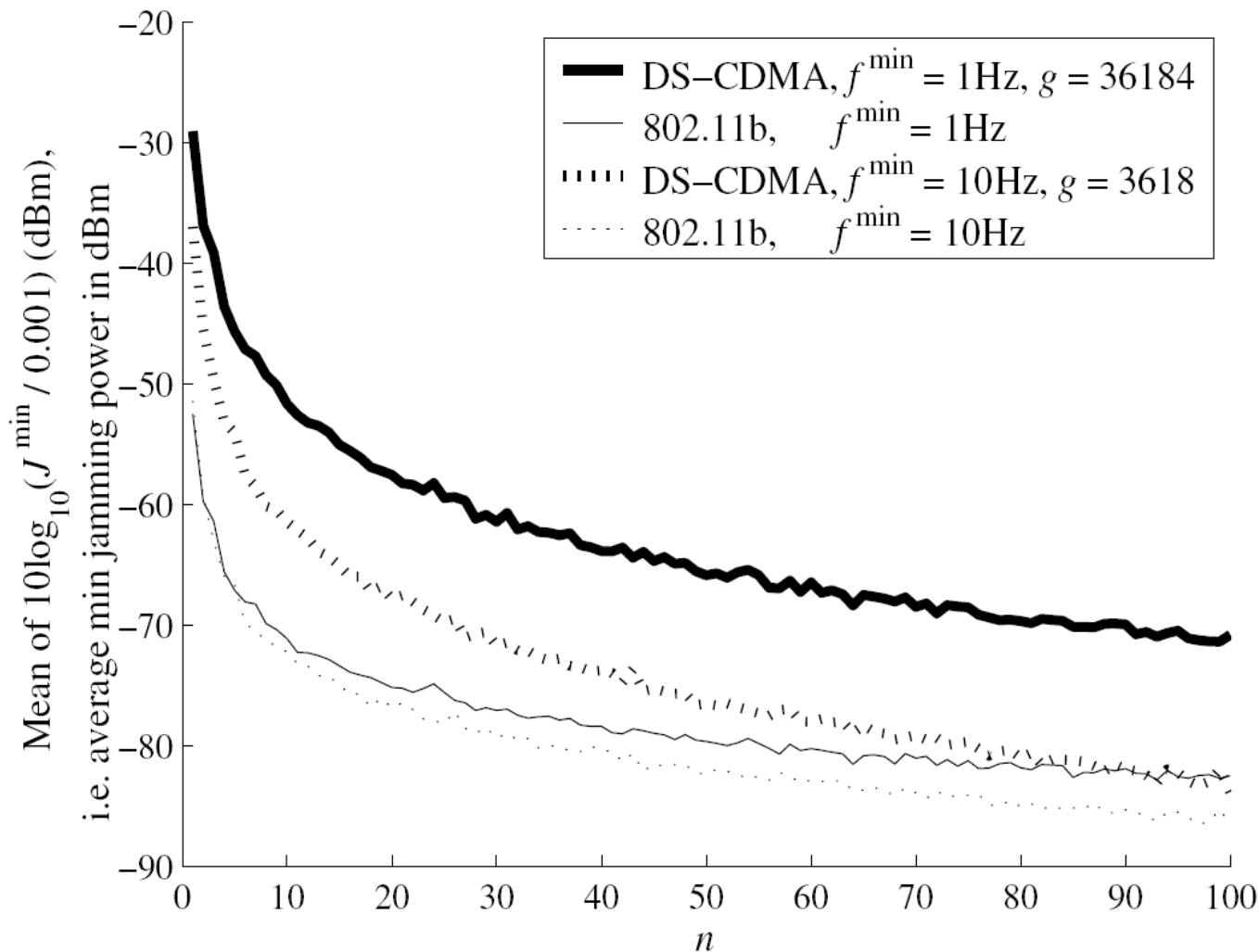
	Max trans power*	RF band [†]
DSSS-CDMA vs. IEEE 802.11b comparison	1watt	2.425 ~ 2.449GHz
DSSS-CDMA vs. IEEE 802.11a comparison	800mw	5.735 ~ 5.795GHz

* According to FCC regulation.

[†] According to IEEE 802.11 specification. Note RF bandwidth also decides baseband bandwidth (i.e. chip rate for DSSS and bit rate for OFDM).



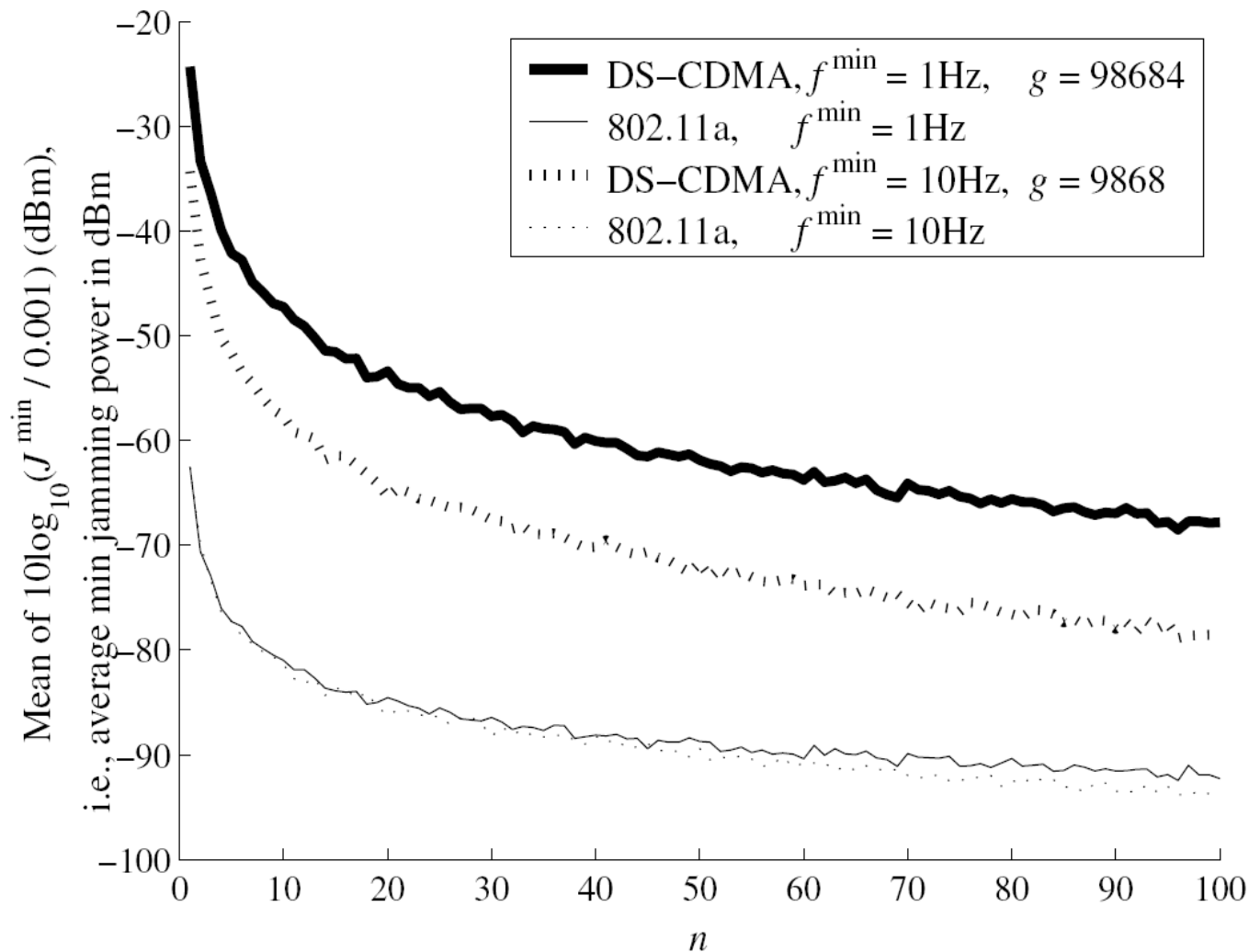
蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.11a/b 更可靠



(a) Comparison with IEEE 802.11b



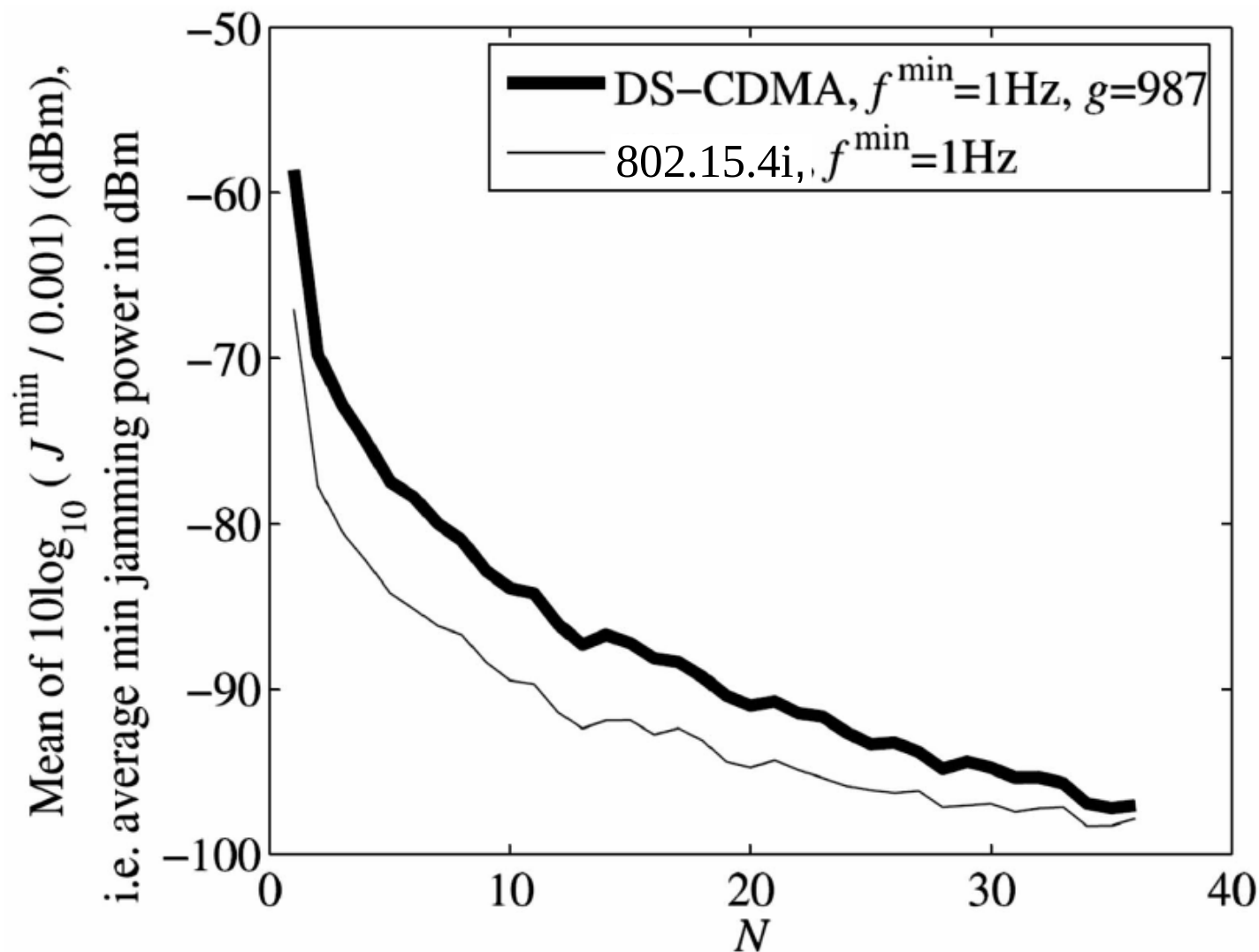
蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.11a/b 更可靠



(b) Comparison with IEEE 802.11a

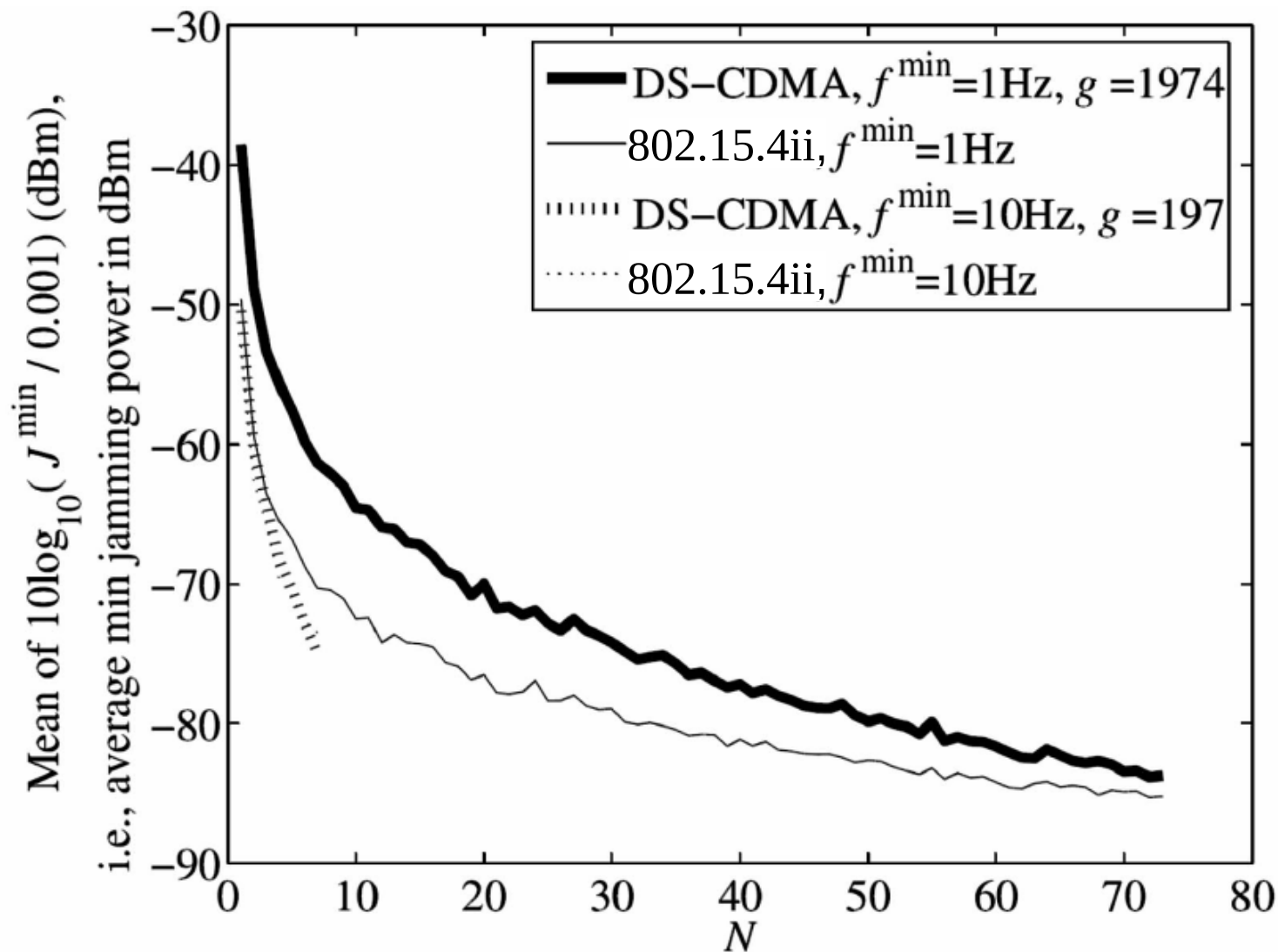


蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.15.4更可靠



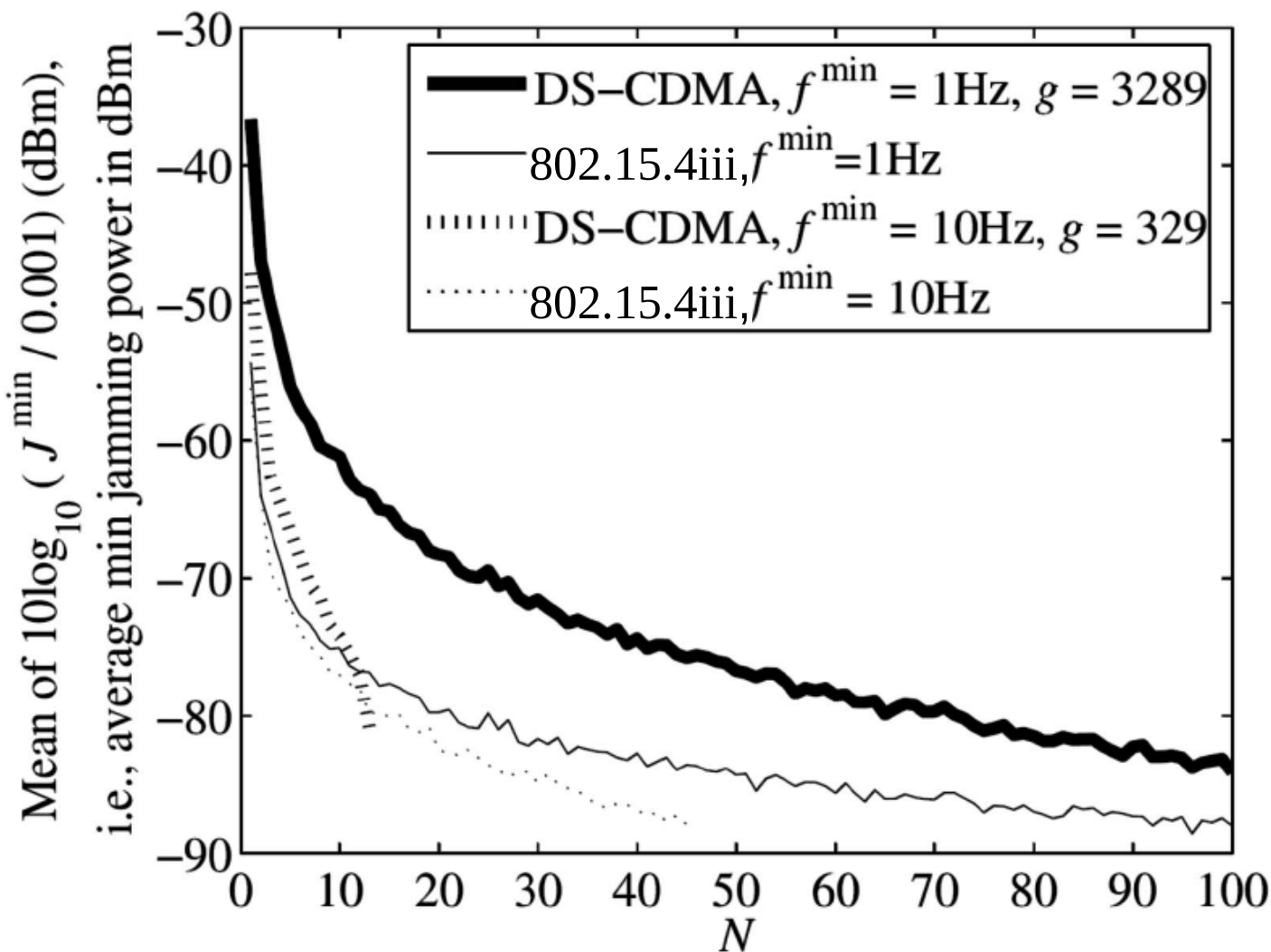


蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.15.4更可靠



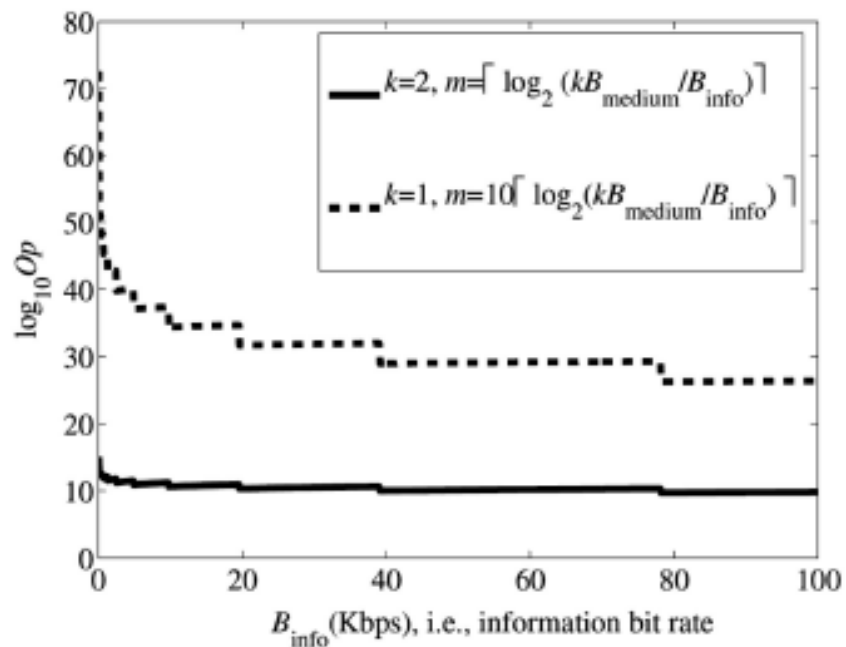
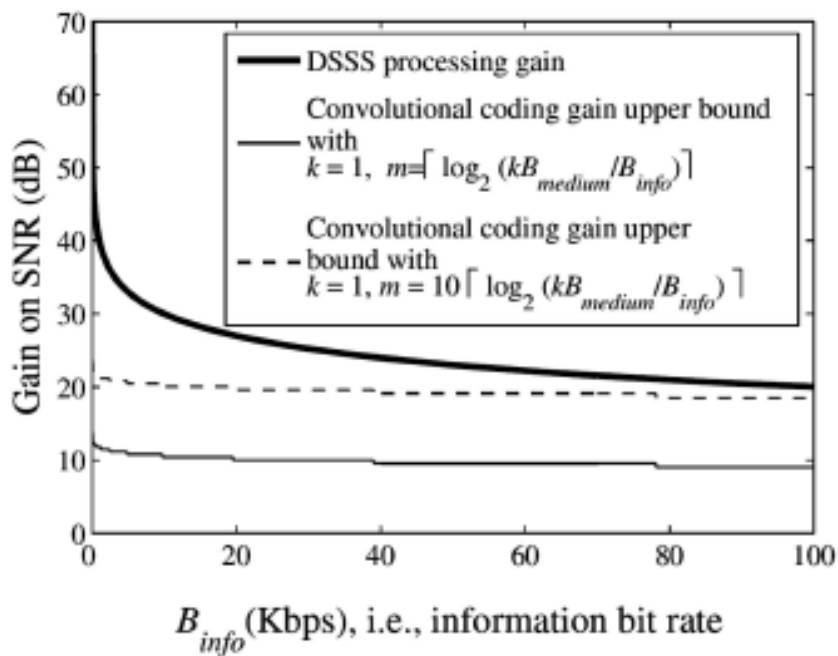


蒙特-卡洛仿真说明DSSS-CDMA比IEEE 802.15.4更可靠





和卷积编码纠错（Convolutional Coding）的对比分析



k input bits, m shift registers



结论

“DSSS-CDMA手机网络模式+最低数据率” 比
“IEEE802.11+重发” 更可靠，更适合无线实时通讯。



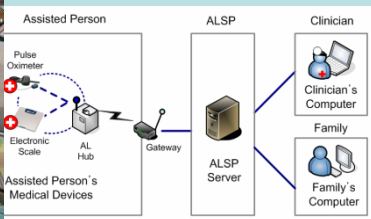
结论

“DSSS-CDMA手机网络模式+最低数据率” 比
“IEEE802.11+重发” 更可靠，更适合无线实时通讯。

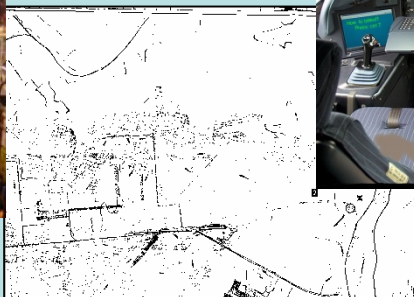
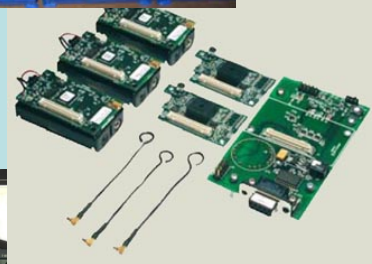
对于实时无线通信，我们要改变以往的思维模式：从追求流量最大化、耗时最小化，到追求可靠性最大化。



CPS 涵盖了社会经济生活的众多方面，可以有广泛的影响



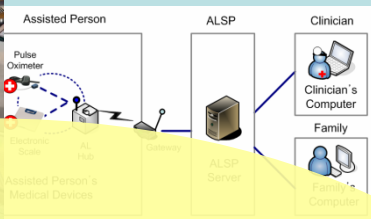
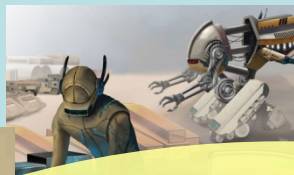
CPS





实时嵌入式系统的底层只是CPS面临的重要课题之一

Real-Time & Embedded Sys.:
Networking
System Architecture
System Integration





CPS可以带动计算机科学以及其他学科各个领域全面的发展

Real-Time & Embedded Sys.

Multimedia, Vision, Graphics, HCI

Networking

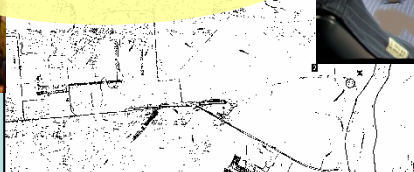
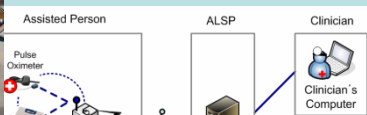
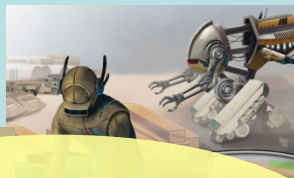
Security

Software Eng.

Knowledge Eng./
Data Mining

System Eng.

CPS

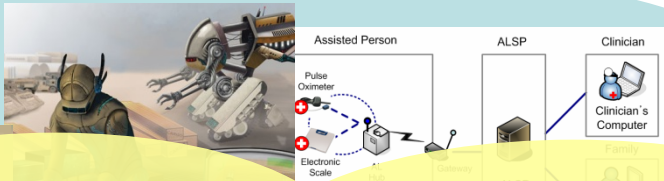




科学技术的发展是经济发展的根本动力



Real-Time &
Embedded Sys.



Multimedia, Vision,
Graphics, HCI



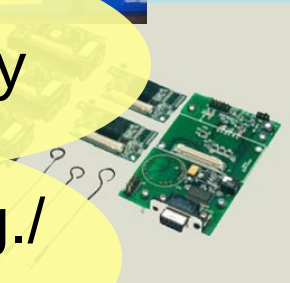
Networking



Security

Software Eng.

CPS



Knowledge Eng./
Data Mining



System Eng.

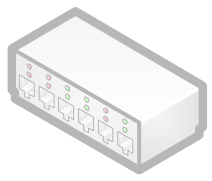


CPS

谢谢!



Middleware



Real-Time
Switch



Real-Time
Wireless LAN



Real-Time
Localization

发表的论文

Journal Publications:

1. **[TMC] Qixin Wang**, Rong Zheng, Ajay Tirumala, Xue Liu, and Lui Sha, "Lightning: A Hard Real-Time, Fast, and Lightweight Low-End Wireless Sensor Election Protocol for Acoustic Event Localization", (accepted for publication) in IEEE Transactions on Mobile Computing.
2. **[TMC07] Qixin Wang**, Xue Liu, Weiqun Chen, Marco Caccamo, and Lui Sha, "Building Robust Wireless LAN for Industrial Control with the DSSS-CDMA Cell Phone Network Paradigm", in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol 6, number 6, June, 2007.
3. **[TOSN06] Xue Liu, Qixin Wang**, Wenbo He, Marco Caccamo, and Lui Sha, "Optimal Real-Time Sampling Rate Assignment for Wireless Sensor Networks", in ACM Transactions on Sensor Networks, vol 2, issue 2, May, 2006.

Conference, Workshop and Other Publications:

4. **[RTAS08] Qixin Wang**, Sathish Gopalakrishnan, Xue Liu, and Lui Sha, "A Switch Design for Real-Time Industrial Networks", (full paper accepted for publication) in Proceedings of the 14th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2008), 2008.
5. **[RTSS07] Qixin Wang**, Xue Liu, Jennifer Hou, and Lui Sha, "[GD-Aggregate: A WAN Virtual Topology Building Tool for Hard Real-Time and Embedded Applications](#)", in Proceedings of the 28th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS 2007), pp. 379-388, Tucson, Arizona, Dec. 3-6, 2007.
6. **[HCMDSS07a] Mu Sun, Qixin Wang**, and Lui Sha, "Building Safe and Reliable MD PnP Systems", in Joint Workshop on High Confidence Medical Devices, Software, and Systems (HCMDSS) and Medical Devices Plug-and-Play (MD PnP), June, 2007.
7. **[HCMDSS07b] Jennifer C. Hou, Qixin Wang**, et. al., "PAS: A Wireless-enabled, Sensor-integrated Personal Assistance System for Independent and Assisted Living", in Joint Workshop on High Confidence Medical Devices, Software, and Systems (HCMDSS) and Medical Devices Plug-and-Play (MD PnP), June, 2007.
8. **[ICSMC06] Qixin Wang**, Wook Shin, Xue Liu, et. al., "I-Living: An Open System Architecture for Assisted Living", (invited paper) in Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2006.
9. **[RTSS05] Qixin Wang**, Xue Liu, Weiqun Chen, Wenbo He, and Marco Caccamo, "[Building Robust Wireless LAN for Industrial Control with DSSS-CDMA Cellphone Network Paradigm](#)", in Proc. of the 26th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS 2005), Miami, USA, December, 2005. ([Power Point](#))([Poster-Sized Power Point](#))
10. **[ICAS05] Xue Liu, Rong Zheng, Jin Heo, Qixin Wang**, and Lui Sha, "[Timing Control for Web Server Systems Using Internal State Information](#)", in Proc. of Joint International Conference on Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services (ICAS-ICNS 2005), 2005.
11. **[RTSS04] Qixin Wang**, Rong Zheng, Ajay Tirumala, Xue Liu, and Lui Sha, "[Lightning: A Fast and Lightweight Acoustic Localization Protocol Using Low-End Wireless Micro-Sensors](#)", in Proc. of the 25th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS 2004), Lisbon, Portugal, December, 2004. ([Power Point](#)) ([Demo Video](#))
12. **[RTSS03] Xue Liu, Qixin Wang**, Lui Sha and Wenbo He, "[Optimal QoS Sampling Frequency Assignment for Real-Time Wireless Sensor Networks](#)", in Proc. of the 24th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS 2003), Cancun, Mexico, December, 2003.
13. **[IPSN03] Qixin Wang**, Wei-Peng Chen, Rong Zheng, Kihwal Lee, and Lui Sha, "[Acoustic Target Tracking Using Tiny Wireless Sensor Devices](#)", in Proc. of the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03), Lecture Notes in Computer Science 2634, Springer, 2003.