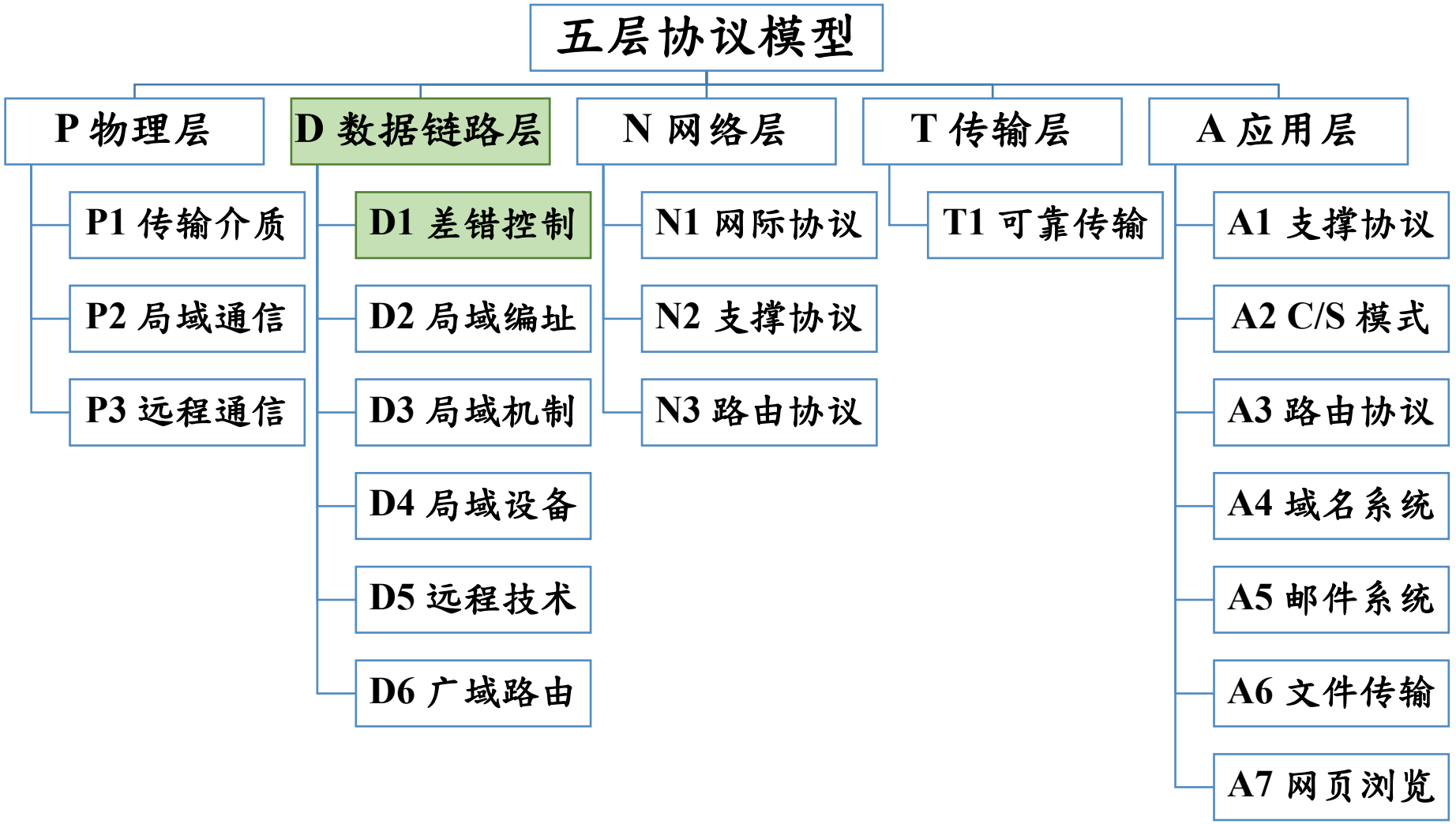
计算机网络

T04 可靠信道编码

厦门大学信息学院软件工程系

黄炜 副教授

主要内容


五层协议模型
P 物理层
D 数据链路层
N 网络层
T 传输层
A 应用层
P1 传输介质
P2 局域通信
P3 远程通信
D1 差错控制
D2 局域编址
D3 局域机制
D4 局域设备
D5 远程技术
D6 广域路由
N1 网际协议
N2 支撑协议
N3 路由协议
T1 可靠传输
A1 支撑协议
A2 C/S 模式
A3 路由协议
A4 域名系统
A5 邮件系统
A6 文件传输
A7 网页浏览

主要内容

- 传输差错的原因
- 差错控制编码
  - 奇偶校验码、Internet校验和、CRC
  - 计算方法、作用与局限

对应课本章节

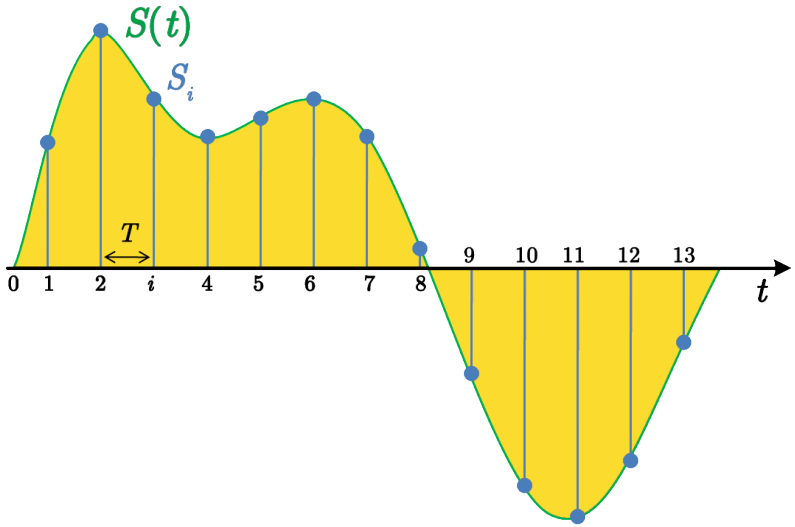
- **PART II Data Communication Basics**
  - **Chapter 8 Reliability And Channel Coding**

艾滋器官移植事故 台大和成大医院各罚15万

Reactive vs. Negative

从现实社会到虚拟世界

- 现实世界：连续的
  - 时间上的、数值上的，如：挥手，如：声波、光波
  - 如果不能找到规律，则需要大量的存储能力
- 计算机世界：离散的
  - 时间上：采样；数值上：编码
  - 数字化
    - 1号时间、2号时间、……
    - 1号音量、2号音量、……



*信息熵（Entropy）

- 六个字符与六位数字的信息量

$$
\begin{aligned}
H(X) &= -\sum_{i=1}^{n} p(x_i)\log_b p(x_i) \\
&= -\sum_{i=1}^{256^6} \frac{1}{256^6}\log_2 \frac{1}{256^6} \\
&= -256^6 \frac{1}{256^6}\log_2 \frac{1}{256^6} \\
&= 6\log_2 256 \\
&= 48\text{bit} \\
&= 6\text{byte}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
H(X) &= -\sum_{i=1}^{n} p(x_i)\log_b p(x_i) \\
&= -\sum_{i=1}^{10^6} \frac{1}{10^6}\log_2 \frac{1}{10^6} \\
&= -10^6 \frac{1}{10^6}\log_2 \frac{1}{10^6} \\
&= 6\log_2 10 \\
&\approx 19.93\text{bit} \\
&\approx 2.49\text{byte}
\end{aligned}
$$

1. 传输差错

传输差错（Transmission Errors）

- 所有通信系统都容易犯错
  - 原因：物理特性；未达到工业标准
  - 小错比大错更难发现
- 这里的差错是自然产生的，不是恶意拼凑的错误
- 分类
  - 干扰（Interference）：元器件电子辐射；宇宙背景辐射
  - 失真（Distortion）：长距离传输会受到干扰
  - 衰减（Attenuation）：通过介质的信号会变弱

传输差错

- 原因
  - 闪电、电涌和其他电磁干扰会给电子元件或用于通信的电线带来不必要的电流。
- 现象
  - 编码的二进制数据信号，0可能变成1或1变成0。
- 分类：单个比特、突发差错、模糊差错
  - 单个比特差错是最常发生的
  - 突发差错是最少发生的

传输差错

- 香农定理：增加信噪比（signal-to-noise ratio）
  - 屏蔽线等可以降低噪声，但无法完全消除
  - 然而错误可以被检测（detect）到
- 错误检测（Error detection）增加开销（overhead）
  - 某些情况下错误的比特可以自动纠正
- 错误处理是一个权衡（tradeoff）

克服信道错误的两种方法

- 冗余可用于纠错
  - 压缩：去除无不确定性的部分（冗余）
  - 校验：利用冗余信息检测或纠正错误
- 信道编码是可用于克服传输错误的数学方法
  - 前向错误纠正（Forward Error Correction，FEC）
  - 自动重传请求（Automatic Repeat reQuest，ARQ）

克服信道错误的两种方法

- 前向错误纠正

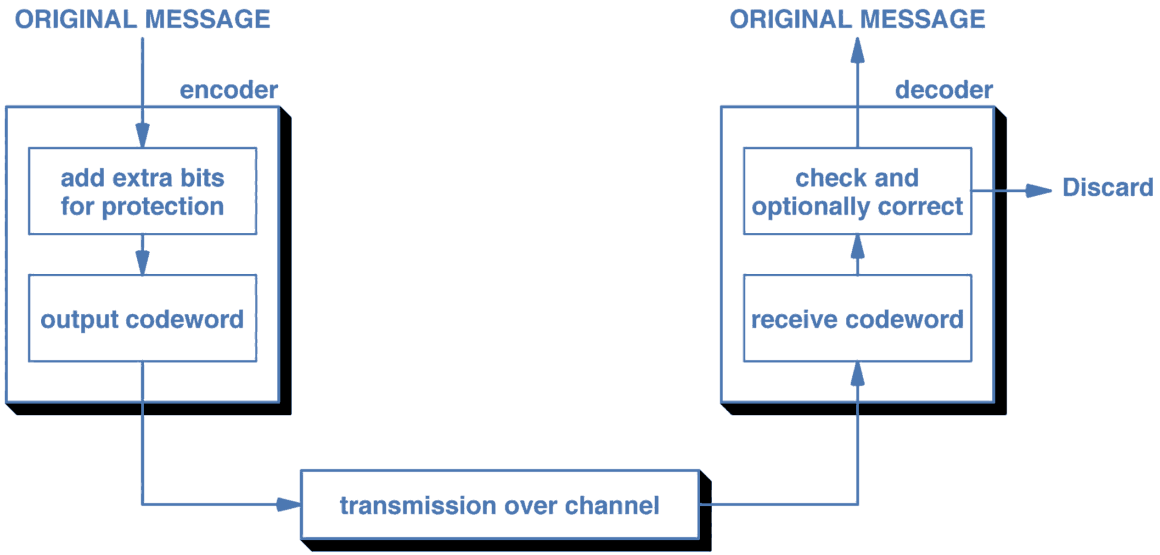


Figure 8.3 The conceptual organization of a forward error correction mechanism.

- 自动重传请求
  - 每当发送消息到对方，发回一个简短的确认（ACK）消息，如果没有收到，则假设消息丢失，应重传副本。
  - 接收方如果发现信息错误，则丢弃

前向错误纠正技术的两种编码

- 分块错误编码（Block Error Codes）
  - 将数据分块(block)，将冗余(redundancy)加到每块信息中
  - 无记忆(memoryless)：编码依赖于给定块，和前面的块无关
- 卷积错误编码（Convolutional Error Codes）
  - 数据被视为位序列，连续计算编码
  - 计算的码取决于当前输入和以前的一些位流
  - 卷积码是有记忆码（codes with memory）

2. 简单的校验方法

校验位和奇偶校验

- 奇偶校验（parity check）是一种机制
  - 发送方根据消息序列计算一个额外的位附加在原有消息序列后，称为奇偶位（parity bit）
  - 接收方收到所有位后，校验并丢弃奇偶位。
- 两种机制：奇（odd）和偶（even）
  - 奇校验中消息和校验位共有奇数个1；偶校验共有偶数个1
  - 发送和接收方应有同样的模式

单个奇偶校验位

- 多说无益，看代码吧

```
unsigned char val=0x5B;
unsigned char pcOdd=1;
printf("Bits: ");
for (size_t i = 0; i < 8; i++) {
        printf("%d ", val >> (7-i) & 1);
}
for (size_t i = 0; i < 8; i++) {
        pcOdd ^= val & 1;
        val >>= 1;
}
printf("\nParity bit: Even: %d; Odd: %d.\n", !pcOdd, pcOdd);
```

```
Bits: 0 1 0 1 1 0 1 1
Parity bit: Even: 1; Odd: 0.
```

校验位和奇偶校验

- 奇偶校验码是可检测错误的信道编码中的一种弱形式
  - 可以检测错误，但不能纠正错误
- 只能检测部分错误
  - 奇数个出错：认为是错的；偶数个出错：误认为是对的
  - 未出错：对的
- 行列码

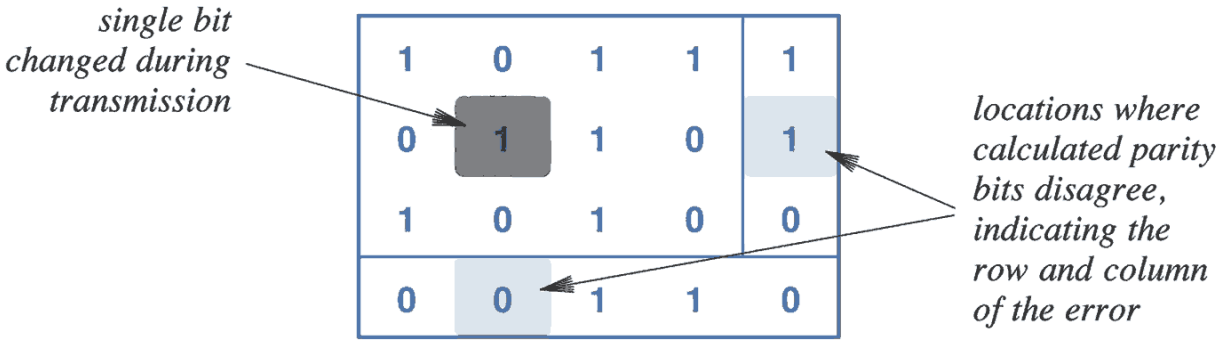


Figure 8.8 Illustration of how a single-bit error can be corrected using a row and column encoding.

块错误码和（n，k）符号

- 数据字（Datawords）：所有消息的集合
- 码字（Codewords）：所有正确编码的集合
- (n,k) 码
  - 数据字有k位，校验码r位附加在数据字后形成码字
  - 度量的好坏是码率（Code rate）：$R=k/n$
- 成功的关键在于选择的是有效码字的可能组合的子集
  - 有效的子集被称为一个码本（codebook）
  - 以奇偶校验码为例，一半是码本

汉明距离：代码强度的量度

- 汉明距离（Hamming distance）
  - 两个字符串汉明距离是它们不同位的数量

Dataword	Codeword
0 0	0 0 1
0 1	0 1 0
1 0	1 0 0
1 1	1 1 1

(a)

d(001,010) = 2	d(010,100) = 2
d(001,100) = 2	d(010,111) = 2
d(001,111) = 2	d(100,111) = 2

(b)

- 码本的最小汉明距离（minimum Hamming distance）
  - 没有理想的信道编码：修改足够多位可转换至合法的码字
  - 码本中任何码字转换成另一个码字所需要改动位数的下限

Internet 校验和

- **Internet校验和（Internet checksum）**
  - 数据字不需要固定大小
  - 不足16位补0
  - 计算校验和
  - 发送方在消息后添加校验和

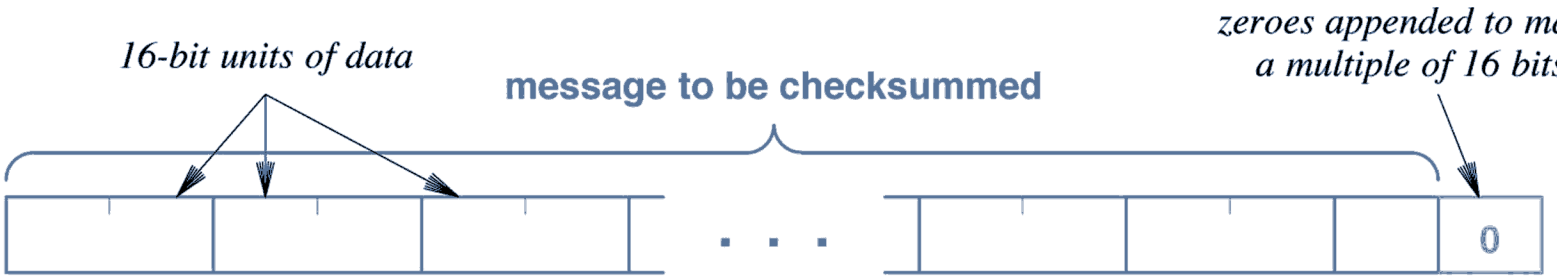
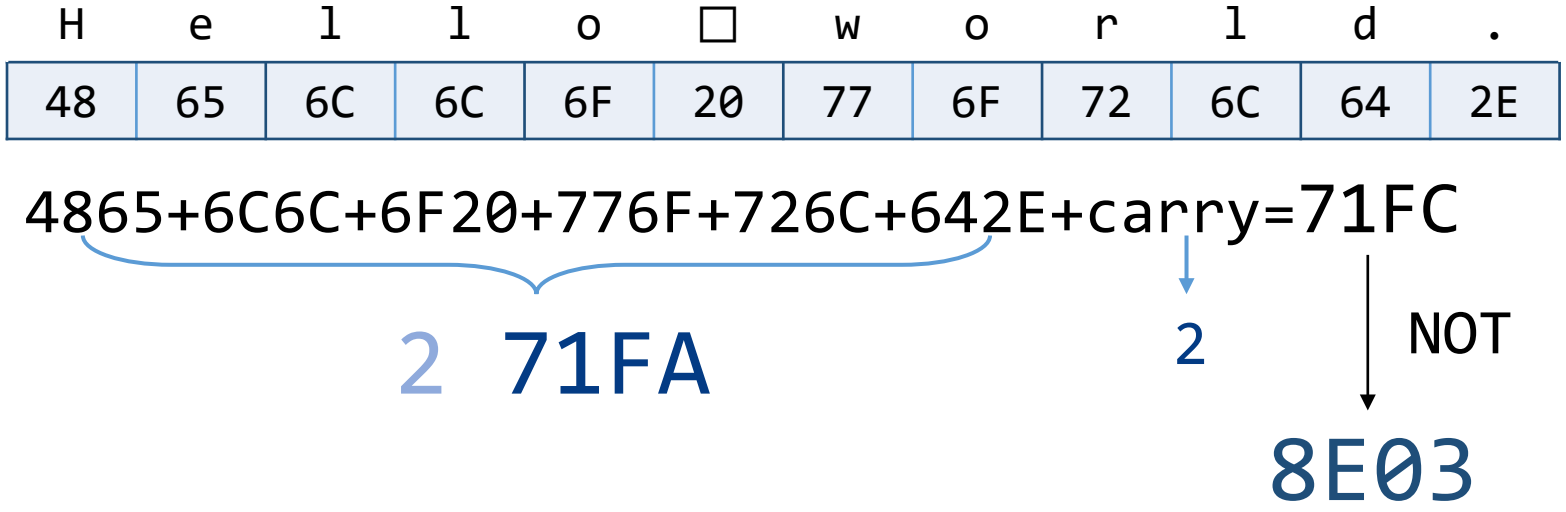


Figure 8.9 The Internet checksum divides data into 16-bit units, appending zeroes if the data is not an exact multiple of 16 bits.

Internet 校验和

- 为了计算校验和，发送者把消息每16位作为一个整数计算总和，如果结果大于16位，则重复上述过程。
- 校验和尺寸小，额外传输开销小



计算Internet Checksum

- 以下代码源于 RFC 1071 文档。

```
/* Compute Internet Checksum for "count" bytes beginning at location "addr". */
register long sum = 0;
while (count > 1)  {
  /* This is the inner loop */
  sum += *(unsigned short *) addr++;  count -= 2;
}
/* Add left-over byte, if any */
if (count > 0)
  sum += *(unsigned char *) addr;
/* Fold 32-bit sum to 16 bits */
while (sum>>16)
  sum = (sum & 0xffff) + (sum >> 16);
checksum = ~sum;
```

3. 循环冗余检验码

循环冗余检验码（CRC）

- 循环冗余检验码（ Cyclic Redundancy Codes ）
  - 一种根据网络数据包或文件等数据产生简短固定位数校验码的散列（Hash）函数，主要用来检测或校验数据传输或者保存后可能出现的错误。
- 重要特征
  - 任意消息字长
  - 出色的错误检测
  - 快速硬件实现（位移寄存器，异或门）

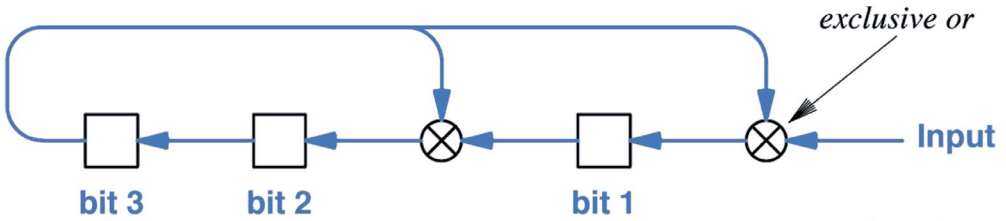


Figure 8.13 A hardware unit to compute a 3-bit CRC for $x^3 + x^1 + 1$.

循环冗余检验码（CRC）

- 可以视为不带借位的二进制数除法

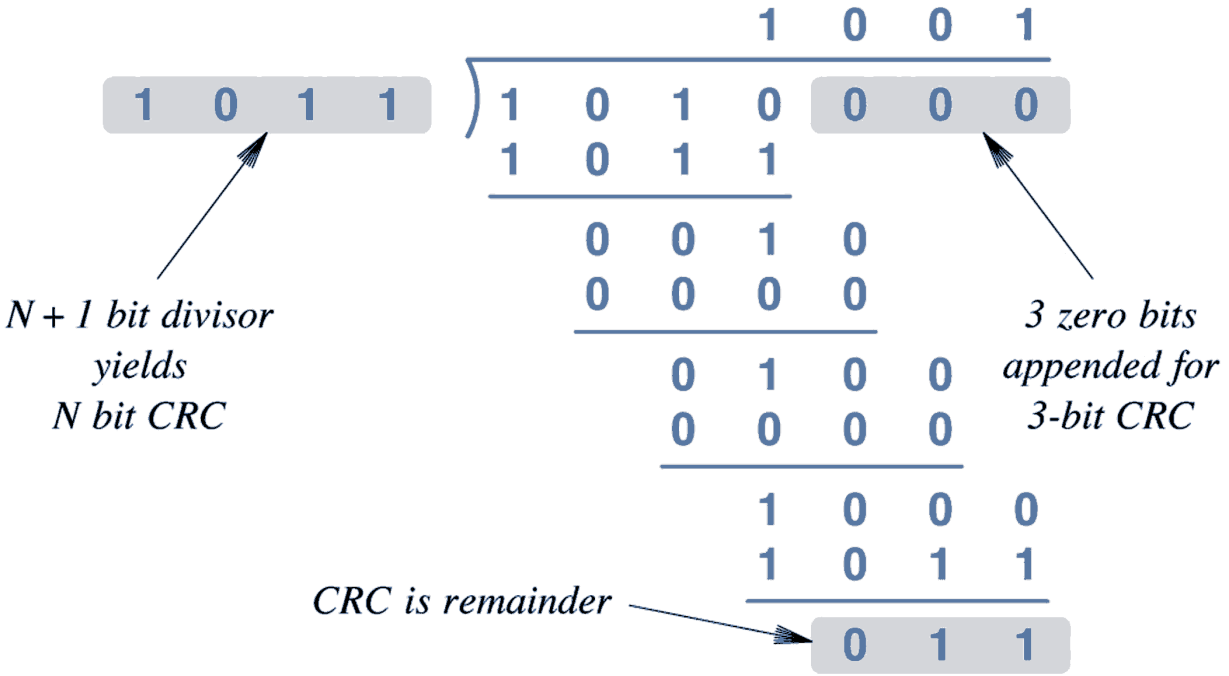


Figure 8.12 Illustration of a CRC computation viewed as the remainder of a binary division with no carries.

循环冗余检验码（CRC）

- 每个位的二进制数作为一个多项式的系数
- 图8.12除数1011可视为 $1\times x^3+0\times x^2+1\times x^1+1\times x^0=x^3+x+1$
  - 被除数1010000可以视为 x^6+x^4
- 除数多项式称为生成多项式（generator polynomial）
  - 一个理想的多项式是不可约的（只能被自己和1整除）
  - 有一个以上的非零系数多项式可检测所有的单比特错误

*生成多项式 $G(x)$ 的国际标准

- **生成多项式 $G(x)$ 的国际标准**
  - **CRC-8** $x^8 + x^2 + x + 1$
  - **CRC-10** $x^{10} + x^9 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$
  - **CRC-12** $x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$
  - **CRC-16** $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$
  - **CRC-CCITT** $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
  - **CRC-32**

$$x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

突发错误（ Burst Errors ）

- 两种常见错误使得CRC很有用
  - 硬件故障有时会导致损坏一组特定位，如：垂直错误。
  - 在单个位置附近一小部分位的误差特别有用，即突发错误。

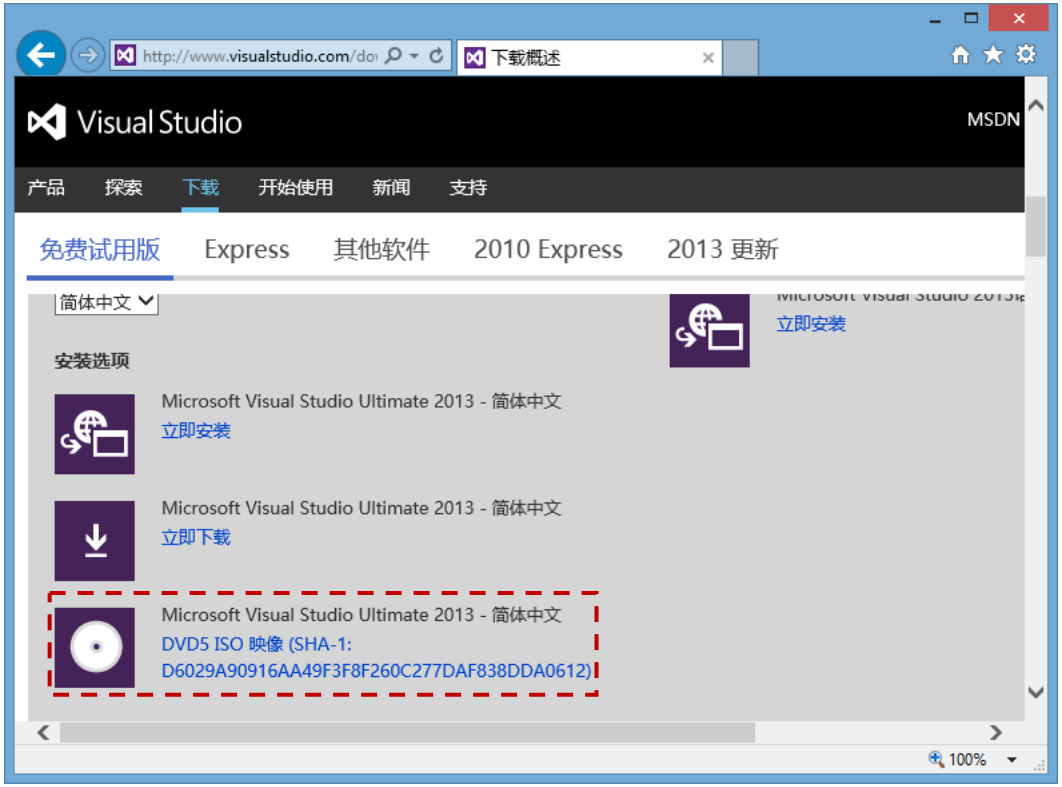
帧格式和错误检测机制

- 网络通常将错误检测信息和每一帧联系起来。
  - 发送方计算信息的校验和或CRC，并随着帧数据发送附加信息。
  - 接收方用相同的方法计算校验值。
    - 一般接收方并不是重复计算校验值再与发送方发来的校验值比较，而是将校验值一起计算。
    - 复杂的发送方，简单的接收方。（好处？）

Figure 7.11 A modification of the frame format from Figure 7.3 that includes a *16*-bit CRC.

*更多的校验和

- 没有完美的错误检测方案，因为传输错误可以影响更多的信息以及数据。
- 信息安全用的校验和
  - MD5、SHA系列



计算机网络

T04

谢谢

厦门大学信息学院软件工程系

黄炜 副教授