

4.1 一个 4bits DAC 产生下列电压值 (code 0 到 code 15)

0.0465, 0.3255, 0.7166, 1.0422, 1.5298, 1.8236, 2.1693, 2.5637, 2.8727, 3.3443, 3.6416, 4.0480, 4.3929, 4.7059, 5.0968, 5.5050

理想的 DAC code 0 输出为 0 V , 理想增益为 400 mV/bit。假设采用最佳拟合直线作为参考回答下列问题。

(a) 计算 DAC's 增益 (gain V/bit), 增益误差 (gain error), 偏移 (offset) 及偏移误差 (offset error)。

(b) 什么是 LSB 步长, 计算其 LSB 步长?

(c) 计算 DAC 的绝对误差转换曲线, 归一化到 1 LSB。

(d) 该 DAC 输出是否单调?

(e) 计算 DAC 的 DNL 曲线, 该 DAC 能否通过 $\pm 1/2$ LSB 的 DNL 测试?

答: (a) 由最佳拟合法易知: $G_{DAC} = 0.365 \text{ V/V}$, $\text{offset} = -1.72 \text{ mV}$

$$\text{故: } \Delta G = \frac{G_{DAC} - G_{ideal}}{G_{ideal}} \times 100\% = \frac{0.365 - 0.4}{0.4} \% \approx -8.64\%$$

$$\text{offset error} = \text{offset} = V_{LE} = -1.72 \text{ mV}$$

$$(b) V_{LSB} = G_{DAC} = 0.365 \text{ V}$$

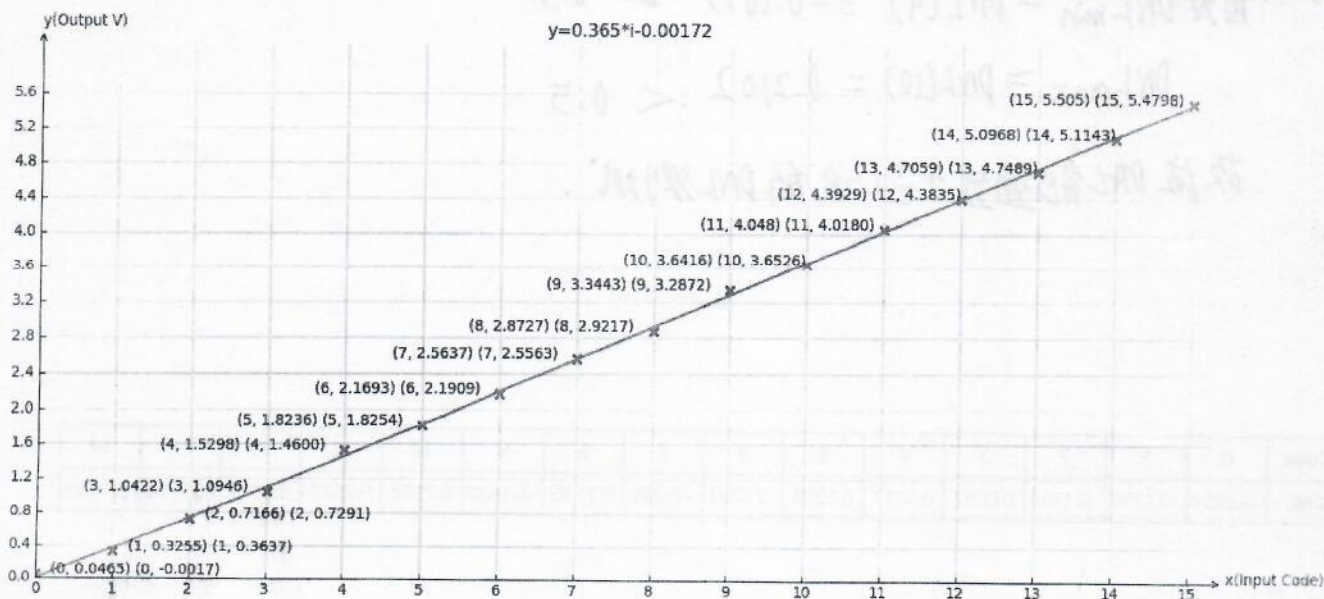
$$(c) \text{ 绝对误差 } \Delta S(i) = \frac{S(i) - S_{ideal}(i)}{V_{LSB}}, \text{ 结果如表所示}$$

(d) 是, 该 DAC 单调

$$(e) DNL(i) = \frac{S(i+1) - S(i) - V_{LSB}}{V_{LSB}}, \quad \left. \begin{array}{l} DNL(\min) > -\frac{1}{2} \text{ LSB} \\ DNL(\max) < \frac{1}{2} \text{ LSB} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{能通过测试}$$

DNL -0.236 0.0702 -0.109 0.334 -0.196 -0.0539 0.0792 -0.154 0.290 -0.186 0.112 -0.0561 -0.143 0.0696 0.117

Code	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test Res	0.0465	0.3255	0.7166	1.0422	1.5298	1.8236	2.1693	2.5637	2.8727	3.3443	3.6416	4.048	4.3929	4.7059	5.0968	5.505
Fit Line	-0.0017	0.3637	0.7291	1.0946	1.46	1.8254	2.1909	2.5563	2.9217	3.2872	3.6526	4.018	4.3835	4.7489	5.1143	5.4798
$\Delta S(i)$	0.1272	-0.2039	-0.2282	-0.4318	-0.1921	-0.4827	-0.6313	-0.6466	-0.8956	-0.6997	-0.9808	-0.9632	-1.114	-1.3521	-1.377	-1.3546



4.2. 计算一个 4bit DAC 的 INL 曲线，其 DNL 曲线为下列值：

-0.0815, -0.1356, -0.1133, 0.0057, 0.0218, 0.1308, -0.0361, -0.0950, 0.1136, -0.1633, 0.2101, 0.0512, 0.0119, -0.0706, -0.0919

DAC 码 0 输出为 -0.4919 V。假设最佳拟合直线的增益为 63.1 mV/bit，偏移为 -0.5045 V。该 DAC 是否能通过 $\pm 1/2$ 的 INL 测试？

答：由题， $V_{REF} = 0.0631 i + 0.5045$

$$\text{因为 } INL(i) = \frac{S(i) - S_{REF}(i)}{V_{LSB}}, \text{ 故 } INL(0) = \frac{S(0) - S_{REF}(0)}{V_{LSB}} = \frac{0.4919 - 0.5045}{0.0631} = -0.1997$$

$$\text{因为 } DNL(i) = INL(i+1) - INL(i)$$

$$\text{则： } INL(i) = DNL(i-1) + INL(i-1)$$

由题于条件 $DNL(i)$ 与 $INL(0)$ ，递推得下表。

因为 $\begin{cases} INL_{min} = -0.1997 > -0.5 \\ INL_{max} = 0.1997 < 0.5 \end{cases} \Rightarrow \text{通过 } \pm 1/2 \text{ INL 测试}$

Code	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
INL	0.1997	0.1182	-0.0174	-0.1307	-0.125	-0.1032	0.0276	-0.0085	-0.1035	0.0101	-0.1532	0.0569	0.1081	0.12	0.0494	-0.0425

4.3. 计算一个 4-bit DAC 的 DNL 曲线，其 INL 曲线如下：

0.1994, 0.1180, -0.0177, -0.1310, -0.1253, -0.1036, 0.0272, -0.0089, -0.1039, 0.0096, -0.1537, 0.0565, 0.1077, 0.1196, 0.0490, -0.0429。该 DAC 是否能通过 $\pm 1/2$ LSB 的 DNL 测试？

答：因为 $DNL(i) = INL(i+1) - INL(i)$ ，

则由题条件，递推计算得下表，

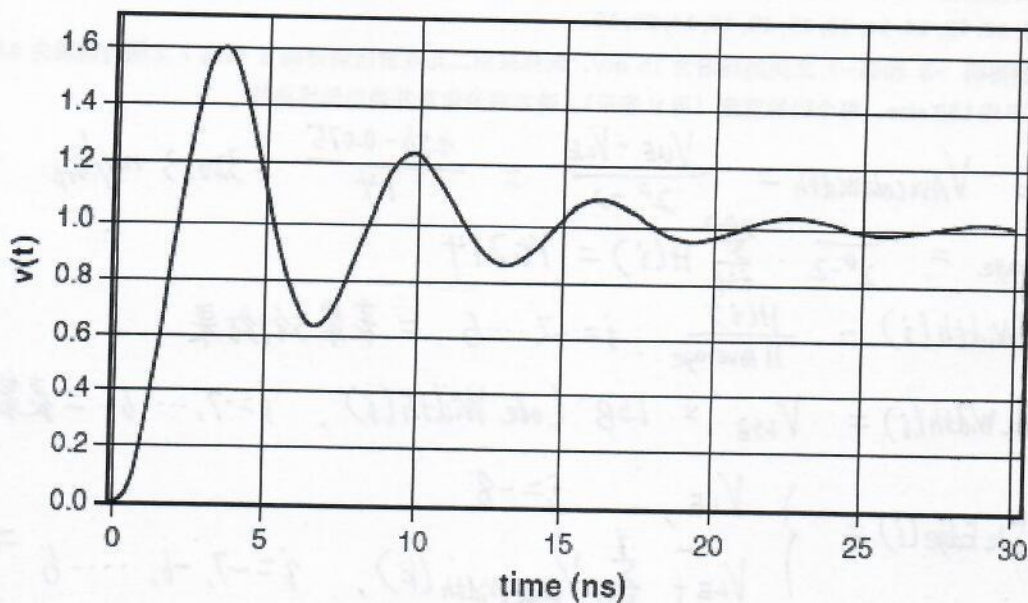
$$\text{因为 } DNL_{min} = DNL(9) = -0.1633 > -0.5$$

$$DNL_{max} = DNL(10) = 0.2102 < 0.5$$

故该 DAC 能通过 $\pm 1/2$ LSB 的 DNL 测试。

Code	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
DNL	-0.0814	-0.1357	-0.1133	0.0057	0.0217	0.1308	-0.0361	-0.095	0.1135	-0.1633	0.2102	0.0512	0.0119	-0.0706	-0.0919

4.4. 用示波器观测到的 DAC 步进响应波形如下:



数据手册给出的建立时间为 10 ns (误差区间为 ± 50 mV), 该 DAC 的建立时间是否快于数据手册指标? 确定该信号的过冲及其上升时间。

答: 该 DAC 建立时间大于 10 ns, 慢于手册指标

$$\text{过冲: } \frac{1.6-1}{1} \% = 60\%$$

$$\text{上升时间: } \text{约为 } 5 \times \frac{1}{4} = 1.25 \text{ ns}$$

4.5. 一个 ADC 输入为 3.340 V DC, ADC 及 DC 信号源的噪声为 15 mV RMS, 假设该噪声为高斯噪声。码 324 和 325 的转换电压为 3.350 V DC, 因此此时 ADC 的预期输出为 324。问 ADC 输出 325 的概率是多少? 如果获得 400 个采样数据, 预期其中有多少个 324? 多少个 325。

$$\text{答: } V_{OL} = 3.34 \text{ V} \quad V_{TH} = 3.35 \text{ V}$$

$$\Delta V = V_{TH} - V_{OL} = 10 \text{ mV}$$

$$P(\text{code}=324) = P(V_{in} < V_{TH}) = \Phi\left(\frac{V_{TH}-V_{OL}}{\sigma_n}\right) = \Phi\left(\frac{10}{15}\right) = 0.7475$$

$$P(\text{code}=325) = 1 - P(\text{code}=324) \approx 1 - 0.7475 = 0.2525$$

$$N(\text{code}=324) = N \times P(\text{code}=324) = 400 \times 0.7475 \approx 299$$

$$N(\text{code}=325) = N \times P(\text{code}=325) = 400 \times 0.2525 \approx 101$$

4.6. 采用线性直方图测试一个补码输出的 4-bit ADC, 结果如下: (从 code -8 开始):

12, 15, 13, 12, 10, 12, 12, 14, 14, 13, 15, 19, 16, 14, 20, 19,

采用二元收索法测得码 -8 和码-7 之间的码沿为 75 mV, 同样采用二元收索法测得码 6 和码 7 之间的码沿为 4.56 V. 求该 4-bit ADC 的平均 LSB size, 每个码的宽度 (用 V 表示), 确定码沿位置并画出转换曲线

解: $V_{LSB} = V_{AveCodeWidth} = \frac{V_{UE} - V_{LE}}{2^0 - 2} = \frac{4.56 - 0.075}{14} = 320.3 \text{ mV/bit}$

$$H_{Average} = \frac{1}{2^0 - 2} \cdot \sum_{i=-7}^{20-2} H(i) = 14.214$$

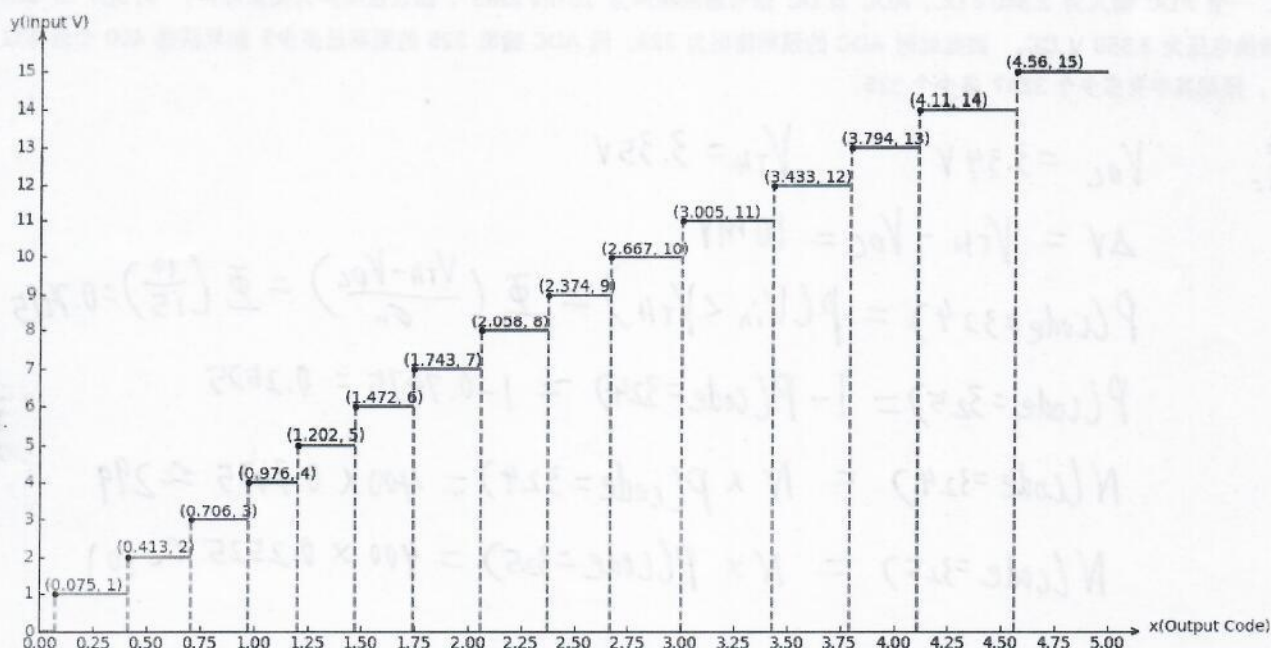
$$CodeWidth(i) = \frac{H(i)}{H_{Average}}, i = -7, \dots, 6 = \text{表第3行结果}$$

$$V_{CodeWidth(i)} = V_{LSB} \times LSB \text{ (CodeWidth(i))}, i = -7, \dots, 6 = \text{表第4行结果}$$

$$V_{CodeEdge(i)} = \begin{cases} V_{LE}, & i = -8 \\ V_{LE} + \sum_{k=-7}^i V_{CodeWidth(k)}, & i = -7, -6, \dots, 6 \end{cases} = \text{表第5行结果}$$

绘制转换曲线如下图所示:

Code	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
Test Result	12	15	13	12	10	12	12	14	14	13	15	19	16	14	20	19
Code Width		1.055	0.915	0.844	0.704	0.844	0.844	0.985	0.985	0.915	1.055	1.337	1.126	0.985	1.407	
V _{code width}		0.338	0.293	0.27	0.226	0.27	0.27	0.316	0.316	0.293	0.338	0.428	0.361	0.316	0.451	
Code Edge	0.075	0.413	0.706	0.976	1.202	1.472	1.743	2.058	2.374	2.667	3.005	3.433	3.794	4.11	4.56	



4.7. 采用正弦直方图法测试一个无符号二进制输出的 4-bit ADC, 结果如下 (code 0 开始):

137, 81, 60, 52, 47, 44, 43, 42, 42, 42, 44, 46, 50, 57, 72, 166.

采用二元收索法测得码 0 和 1 之间的码沿在 14 mV, 第二次采用二元收索法测得码 14 和 15 之间的码沿为 0.95 V。求该 4-bit ADC 的平均 LSB size, 每个码的宽度, 确定码沿位置并画出转换曲线。

答: $V_{LSB} = \frac{V_{UE} - V_{LE}}{2^0 - 2} = \frac{0.95 - 0.014}{2^4 - 2} = 66.8 \text{ mV}$

$\Delta = \frac{V_{UE} - V_{LE}}{2} = \frac{0.95 - 0.014}{2} = 0.468 \text{ V}$

$C_1 = \cos\left(\pi \cdot \frac{H(2^0 - 1)}{N}\right) = \cos\left(\frac{166}{1024} \pi\right) = 0.873$

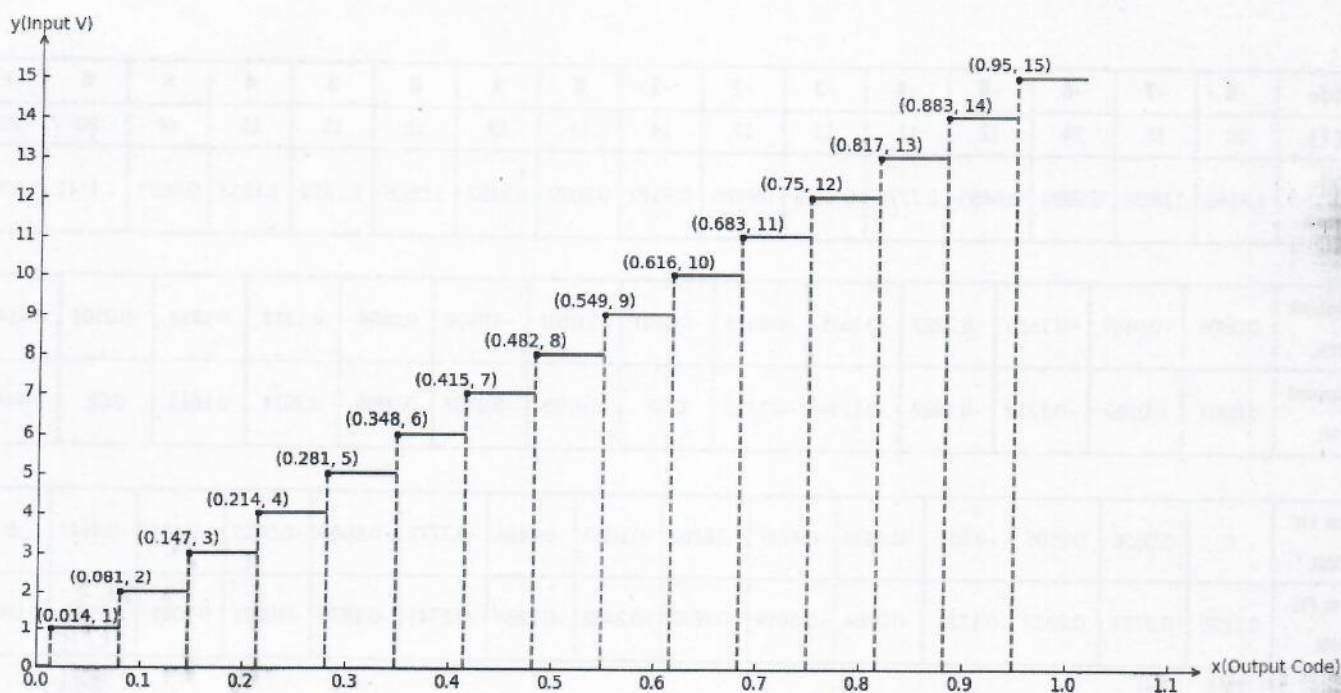
$C_2 = \cos\left(\pi \cdot \frac{H(0)}{N}\right) = \cos\left(\frac{137}{1024} \pi\right) = 0.913$

$peak = \frac{2 \cdot \Delta}{C_1 + C_2} = \frac{2 \times 0.468}{0.873 + 0.913} = 0.524$

$offset = \left(\frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1}\right) \cdot \Delta = -0.0224$

进而由前述公式, 求得下面结果.

Code	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Test Result	137	81	60	52	47	44	43	42	42	42	44	46	50	57	72	166
Code Width		1.0036	0.9917	1.0021	0.9976	0.9932	1.0081	1.0051	1.0066	0.9932	1.0081	0.9976	0.9976	0.9962	1.0006	
V _{code width}		0.0671	0.0663	0.0670	0.0667	0.0664	0.0674	0.0672	0.0673	0.0664	0.0674	0.0667	0.0667	0.0666	0.0669	
Code Edge	0.014	0.0811	0.147	0.214	0.281	0.347	0.415	0.482	0.549	0.616	0.683	0.750	0.817	0.883	0.950	



4.8. 一补码输出的 4-bit ADC 进行线性直方图测试, 结果如下: (从 code -8 开始):

20, 15, 14, 12, 11, 12, 12, 14, 14, 13, 15, 16, 16, 14, 20, 23.

采用终端法计算 DNL 曲线和 INL 曲线。

$$\text{答: } H_{\text{Average}} = \frac{1}{2^0-2} \sum_{i=1}^{2^0-2} H(i) = 14.1429$$

$$\text{Code Width}(i) = \frac{H(i)}{H_{\text{Average}}}$$

$$\text{Endpoint DNL}(i) = 2\text{LSB CodeWidth}(i) - 1, i=1, 2, \dots, 2^0-2.$$

$$\text{Endpoint INL}(i) = \begin{cases} 0, & i=1 \\ \sum_{k=1}^{i-1} \text{Endpoint DNL}(k), & i=2, \dots, 2^0-2 \\ 0, & i=2^0-1 \end{cases}$$

经过曲线拟合:

$$\text{Best Fit Endpoint INL}(i) = -0.03 \cdot i - 0.153$$

$$\text{Best Fit INL}(i) = \text{Endpoint INL}(i) - \text{Best-Fit Endpoint INL}(i), i=1, 2, \dots, 2^0-1$$

$$\text{Best Fit DNL}(i) = \text{Best Fit INL}(i) - \text{Best Fit INL}(i-1), i=1, 2, \dots, 2^0-1$$

得到下表结果。

Code	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
H(i)	20	15	14	12	11	12	12	14	14	13	15	16	16	14	20	23
Code Width	1.4141	1.0606	0.9899	0.8485	0.7778	0.8485	0.8485	0.9899	0.9899	0.9192	1.0606	1.1313	1.1313	0.9899	1.4141	1.6263
Endpoint DNL	0.0606	-0.0101	-0.1515	-0.2222	-0.1515	-0.1515	-0.0101	-0.0101	-0.0808	0.0606	0.1313	0.1313	-0.0101	0.4141		
Endpoint INL	0.0907	0.0199	-0.1214	-0.1922	-0.1214	-0.1215	0.02	0.0199	-0.0507	0.0906	0.1614	0.1613	0.02	0.4441		
Best Fit DNL	0	0.0606	0.0505	-0.101	-0.3232	-0.4747	-0.6262	-0.6363	-0.6464	-0.7272	-0.6666	-0.5353	-0.404	-0.4141	0	
Best Fit INL	0.1826	0.2733	0.2932	0.1718	-0.0204	-0.1418	-0.2633	-0.2433	-0.2234	-0.2741	-0.1835	-0.0221	0.1392	0.1592	0.6033	