

возрастать при $h_3 \approx \lambda$. В этом существенное отличие рассматриваемого волноводно-интерференционного метода от обычных методов интерферометрии, где для тонких слоев точность снижается. Схема расположения маски при изготовлении одного из образцов показана на рис. 2, а. На образец была нанесена пленка полистирола толщиной $h_2 = 1,079 \pm 0,002$ мкм, что соответствует левой границе области B_1 на рис. 1. В системе с призмным устройством ввода одновременно возбуждались TE_1 , TM_1 -волноводные волны. Интерференционные картины рассеянных волн фотографировались, и по результатам фотометрирования негативов определялась ширина интерференционных полос. Одновременное возбуждение двух TE -, TM -волн и получение интерференционной картины рассеянных волн подробно описаны в работе [2]. Результаты определения изменений толщины слоя $h_3(z)$, рассчитанные на ЭВМ по системе уравнений (1) — (3), представлены на рис. 2, б. Отмеченная погрешность измерений соответствует $\Delta\lambda/\lambda = 0,1$.

Проведенный анализ и экспериментальные исследования показали возможность применения волноводно-интерференционного метода измерений плавных изменений толщины диэлектрических неволноводных слоев на основе явления интерференции рассеянных волноводных волн с разной поляризацией в системе из исследуемого слоя и дополнительной волноводной пленки. Метод измерений является недиструктивным, если используются дополнительные пленки, которые легко удаляются, например органические пленки полистирола или полиметилметакрилата. Метод может быть применен как непосредственно для задач планарной волноводной оптики, так и в других областях техники, где требуются исследования тонких диэлектрических слоев с изменениями параметров в плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов А. Ю., Дерюгин Л. Н., Зайцев С. В., Чекан А. В. Экспериментальное определение изменений толщины оптических волноводных пленок по интерференции полей рассеяния мод с разной поляризацией.— *Опт. и спектр.*, 1983, т. 54, № 1.
2. Агапов А. Ю., Зайцев С. В. Интерференция рассеянных мод тонкопленочного оптического волновода.— *Опт. и спектр.*, 1981, т. 51, № 4.

Поступило в редакцию 6 апреля 1983 г.

УДК 681.335

В. П. ДОРОШЕВ, В. Е. ЯМНЫХ

(Минск)

ПРЕДЕЛЬНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АЦП

Применение нелинейных (функциональных) шкал является одним из эффективных методов расширения динамического диапазона (ДД) входных сигналов измерительных преобразователей, в том числе аналого-цифровых (АЦП). Известен подход к выбору оптимальной (обеспечивающей минимум погрешности) шкалы квантования сигналов с заданным законом распределения уровней [1, 2]. Однако для большинства случаев применения АЦП невозможно заранее указать закон распределения, что не позволяет найти оптимальную шкалу, и, кроме того, реализация шкал произвольного вида зачастую связана с заметным усложнением аппаратуры. В связи с этим на практике в системах передачи данных [3], телевидении [4], связи [5] и в других областях используется ограниченный набор функциональных шкал, причем некоторые из них оказываются достаточно близкими к оптимальным шкалам для сигналов, действующих в указанных системах.

Целью работы является сравнение наиболее распространенных функциональных АЦП по величине достижимого ДД при заданном числе уровней и среднеквадратической погрешности квантования синусоидального входного сигнала.

Выбор синусоидального сигнала обусловлен следующими причинами: во-первых, он широко применяется для автоматизированных испытаний АЦП [6, 7]; во-вторых, сравнительно просто обеспечивается прецизионность формы этого сигнала; в-третьих, облегчается экспериментальная проверка результатов анализа, поскольку среднеквадратическая погрешность его совпадает с коэффициентом гармоник K_g [8], который, в свою очередь, измеряется стандартными прямопоказывающими приборами.

Зависимость предельного ДД функциональных АЦП от числа уровней квантования и коэффициента гармоник.

В работе проведено исследование ДД, ограниченного только шумами квантования следующих функциональных АЦП: логарифмического [5], логарифмического и квазилогарифмического с линейным начальным участком (соответственно линейно-логарифмического и линейно-сегментного) [5], смещенно-логарифмического [3], дробно-степенного [9]. Для сравнения приведен также ДД линейного АЦП. С помощью ЭВМ типа СМ-3 рассчитывался K_r синусоидального сигнала в функции от общего числа уровней квантования (квантов) N , параметра нелинейности C_i , а также от ДД, определенного как

$$D = \log_2 (X_{\max}/X_{\min}),$$

где X_{\max} — максимальная амплитуда входного сигнала, соответствующая N ; X_{\min} — минимальная амплитуда входного сигнала, при которой $K_r \leq K_d$. Полученные зависимости $D = f(K_d, N, C_i)$ аппроксимировались аналитическими выражениями, которые, в свою очередь, исследовались на экстремум. Максимальный ДД D_{\max} соответствовал оптимальному значению параметра нелинейности $C_{i \text{ opt}}$, причем для составных шкал (линейно-логарифмической, линейно-сегментной) $C_{i \text{ opt}}$ определялся из условия равенства K_r в точке перехода от одной шкалы к другой.

В табл. 1 приведены характеристики шкал АЦП: функция связи входного сигнала X и его цифрового эквивалента N_i вида $N_i = \varphi(X)$; параметр нелинейности C_i ; искаженный шумом квантования сигнал АЦП, полученный путем обратного преобразования цифрового эквивалента N_i в аналоговую величину, имеющую размерность входного сигнала $Y = F(N_i)$.

В табл. 2 приведены выражения для расчета K_r , D , D_{\max} , а на рисунке — зависимости вида $D_{\max} = L(N) |_{K_d = \text{const}}$, построенные по выражениям этой таблицы, причем указанные зависимости усреднены для значений $K_d = 0,3 \div 10\%$. Для линейно-логарифмического и дробно-степенного АЦП при малых D_{\max} приведенные в табл. 2 выражения неточны и поэтому заменены численным расчетом на ЭВМ, что отражено на графиках штриховыми линиями. Цифры на рисунке соответствуют номерам АЦП табл. 1, 2.

Анализ полученных выражений и графиков позволяет сделать следующие выводы.

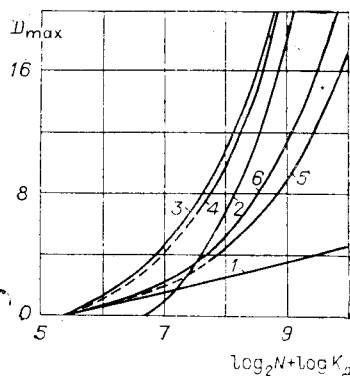
1. Динамический диапазон функциональных АЦП существенно выше ДД линейного АЦП при одинаковых K_d и N .
2. Наибольший ДД имеет линейно-логарифмический АЦП.
3. Динамический диапазон АЦП со смещенно-логарифмической шкалой несущественно уступает линейно-логарифмическому АЦП.
4. Максимальный ДД весьма критичен к величине K_d . Например, для линейно-логарифмического АЦП с $N = 256$ при $K_d = 1\%$ $D_{\max} = 10,7$, а при $K_d = 1,3\%$ $D_{\max} = 14,5$, что соответствует изменению ДД в 14 раз.
5. Для всех рассмотренных функциональных АЦП (при равенстве D_{\max} , K_d) число уровней квантования отличается не более чем в 2—3 раза.

В заключение следует отметить, что полученные значения D_{\max} являются предельными для исследованных АЦП, поскольку при анализе учитывалась лишь погрешность квантования, являющаяся методической. Результаты экспериментальной проверки расчетных соотношений для K_r линейного, логарифмического и сегментного АЦП показали, что они выполняются с погрешностью, не превышающей 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мановцев А. П. Введение в цифровую радиотелеметрию.— М.: Энергия, 1967.
2. Шастова Г. А. Кодирование и помехоустойчивость телеметрической информации.— М.: Энергия, 1966.
3. Левин Л. С., Плоткин М. А. Основы построения цифровых систем передачи.— М.: Сов. радио, 1975.
4. Цифровое телевидение/Под ред. М. Н. Кривошеева.— М.: Связь, 1980.
5. Немеровский А. С., Рыжков Е. В. Системы связи и радиорелейные линии.— М.: Связь, 1980.
6. Максимов Н. В. Автоматизация контроля АЦП систем сбора данных.— Измерит. техника, 1982, № 11.
7. Мартин Нил, Арт Мьюто. Динамический контроль аналого-цифровых преобразователей.— Электроника, 1982, № 4.
8. Рубичев Н. А. Оценка и измерение искажений радиосигналов.— М.: Сов. радио, 1978.
9. О возможности увеличения динамического диапазона при аналоговой регистрации сигналов: Пер. с нем.— Экспресс-информация ВИНТИ. Сер. Контрольно-измерительная техника, 1981, № 1.

Поступило в редакцию 20 июня 1983 г.



Номер АЦП	Наименование АЦП	Функция связи входного сигнала и цифрового эквивалента, $N_i = \varphi(X)$	Параметр нелинейности, C_i
1	Линейный	$N_i = \langle N X \rangle$	—
2	Логарифмический	$N_i = \langle \log_{(1+\delta)} X \rangle + N$	δ
3	Линейно-логарифмический	$N_i = \begin{cases} \langle N_{\text{л}} 2^S X \rangle & \text{при } 0 \leq X \leq 2^{-S}, \\ \langle \log_{(1+\delta)} X \rangle + N_l & \text{при } 2^{-S} < X \leq 1 \end{cases}$	δ
4	Смещенно-логарифмический	$N_i = \langle N \log_{(1+\gamma)} (1 + \gamma X) \rangle$	γ
5	Дробно-степенной	$N_i = \langle N X ^\alpha \rangle$	α
6	Квазилогарифмический	$N_i = \begin{cases} \langle N_{\text{л}} b^{k_c} X \rangle & \text{при } 0 \leq X \leq b^{-k_c}, \\ N_{\text{л}} (k+1) + \left\langle \frac{ X - b^{k-k_c}}{b^{k-k_c} (b-1)} N_{\text{л}} \right\rangle & \text{при } b^{-k_c} < X \leq 1 \end{cases}$	b

Номер АЦП	Коэффициент гармонических искажений (K_{Γ}), %	Динамический диапазон, D
1	$K_{\Gamma} = 2^{D-m+5,34}$	$D = \log_2 K_{\text{д}} + \log_2 N - 5,34$
2	$K_{\Gamma} = \sqrt{8^{D+4-S} + \frac{(100\delta)^2}{12}}$	$D = S - 4 + 0,33 \log_2 (K_{\text{д}}^2 - 833\delta^2)$
3	$K_{\Gamma} = \begin{cases} 2^{D-S-m_{\text{л}}+5,34}, & D \geq S; \\ 100\delta/\sqrt{12}, & D < S \end{cases}$	$D = S + m_{\text{л}} - 5,34 + \log_2 K_{\text{д}}$
4	$K_{\Gamma} \approx \sqrt{4^{D+8,34-m-l} + 6,6 \cdot 10^{-3} l^2 2^{2\Delta m}}$ при $l \geq 6$	$D = 0,5 \log_2 (K_{\text{д}}^2 - 6,6 \cdot 10^{-3} l^2 2^{2\Delta m}) - 8,34 + m + l$
5	$K_{\Gamma} = 2^{\alpha D + 4,95 - \log_2 \alpha - m}$ при $\alpha \leq 0,5$	$D = \frac{\log_2 K_{\text{д}} + \log_2 \alpha + m - 4,95}{\alpha}$
6	$K_{\text{д}} = 2^{n_c - m_{\text{л}} + 4,4}$	$D = n_c k_c + m_{\text{л}} - 5,34 + \log_2 K_{\text{д}}$

Примечания: $m = \log_2 N$, $n_c = \log_2 b$, $m_{\text{л}} = \log_2 N_{\text{л}}$, $l = \log_2 \gamma$, $\Delta m = 8 - m$.

Таблица 1

Искаженный АЦП сигнал $Y = F(N_i)$	Примечания
$Y = (N_i/N) \text{sign } X$	$\langle \cdot \rangle$ — целая часть от величины, заключенной в скобках;
$Y = (1 + \delta)^{N_i - N} \text{sign } X$	
$Y = \begin{cases} (N_i/2^S N_{\text{л}}) \text{sign } X, \\ (1 + \delta)^{N_i - N_l} \text{sign } X \end{cases}$	$X \in [-1, 1]$; N — количество квантов шкалы АЦП;
$Y = \frac{1}{\gamma} [(1 + \gamma)^{N_i/N} - 1] \text{sign } X$	$N_{\text{л}}$ — количество квантов на линейном участке шкалы;
$Y = (N_i/N)^{1/\alpha} \text{sign } X$	$S = N_l \log_2(1 + \delta)$; $N_l = N - N_{\text{л}}$ — количество квантов на нелинейном участке шкалы;
$Y = \begin{cases} (N_i/b^{k_c} N_{\text{л}}) \text{sign } X, \\ \left\{ \frac{[N_i - (k+1) N_{\text{л}}] b^{k-k_c} (b-1)}{N_{\text{л}}} + b^{k-k_c} \right\} \text{sign } X \end{cases}$	$\alpha \in [0, 1]$; $k_c = N/N_{\text{л}} - 1$ — число сегментов; $k = \langle k_c + \log_b X \rangle$ — номер сегмента

Таблица 2

Максимальный динамический диапазон, D_{max}	$C_{i \text{ opt}}$
$D_{\text{max}} = D$	—
$D_{\text{max}} = N \log_2 \left(1 + 10^{-2} \sqrt{12K_{\text{д}}^2 - 66/N} \right) - 3,2 - 0,33 \log_2 N$	$\delta_{\text{opt}} = 10^{-2} \sqrt{12K_{\text{д}}^2 - \frac{66}{N}}$
$D_{\text{max}} = \left(N - \frac{41}{K_{\text{д}}} \right) \log_2 (0,035K_{\text{д}} + 1)$	$\delta_{\text{opt}} = 0,035K_{\text{д}}$
$D_{\text{max}} = D$ при $l = l_{\text{opt}}$	$l_{\text{opt}} \approx 2^{2\Delta m} (12,3K_{\text{д}}/2^{\Delta m} - 0,72) \geq 6$
$D_{\text{max}} = 2^{m + \log_2 K_{\text{д}} - 5,85}$	$\alpha_{\text{opt}} = 2^{6,4 - m - \log_2 K_{\text{д}}} \leq 0,5$
$D_{\text{max}} = 0,96 (2^{m-5,34} K_{\text{д}} - 1)$	$n_{c \text{ opt}} = 0,96$