

Рис. 4. Внешний вид сечения раstra цилиндрических микролинз (а) и фрагмент изображения, получаемого в фокальной плоскости микролинзовой структуры (б)

Экспериментально измеренные фокусные расстояния микролинз до отжига составляли 300—350 мкм и не зависели от периода их расположения. После отжига значения фокусных расстояний увеличивались до 400—450 мкм. Числовые апертуры при этом составляли 0,07—0,15 в зависимости от периода расположения линз в растре.

На рис. 4, а приведен (в сечении) внешний вид раstra цилиндрических микролинз с периодом 100 мкм, сформированных в плоской стеклянной подложке. Фрагмент картины с разделением входного оптического пучка на 100 полос шириной 4 мкм каждая дан на рис. 4, б.

Таким образом, получены и экспериментально исследованы растры цилиндрических микролинз со степенью интеграции 100 элементов/см. Изменением топологии маски можно формировать растровые структуры других конфигураций (круглых, квадратных, прямоугольных и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорош В. С., Иванов В. Н., Никитин В. А. Градиентные микролинзы, полученные методом электростимулированной диффузии // *Автометрия*.—1984.—№ 3.
2. Брегеда И. Д., Никитин В. А., Никитина Е. П. и др. Матрица градиентных микролинз, изготовленная методом электростимулированной диффузии // *Автометрия*.—1985.—№ 6.
3. Иванов В. Н., Кондратьев В. А., Никитин В. А. и др. Исследование в ближней ИК-области спектра микролинз, полученных методом электростимулированной диффузии // *Квантовая электроника*.—1984.—11, № 11.

Поступило в редакцию 17 января 1992 г.

УДК 621.391.266 : 681.142.6

А. Н. Тырсин, Ю. С. Дмитриев, В. К. Семенычев
(Самара)

МЕТОД НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПОРАЗЯДНОГО МАЖОРИТАРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ БИНАРНЫХ КОДОВ

Предложен новый метод нелинейной фильтрации данных на основе поразрядного мажоритарного преобразования бинарных кодов. Обладая близкими с медианной фильтрацией статистическими свойствами, он имеет более простую по сравнению с ней аппаратную реализацию. Рассмотрено несколько различных способов поразрядного мажоритарного преобразования бинарных кодов. Приведены схемы устройств для их реализации.

При цифровой обработке сигналов во многих случаях возникает проблема, связанная с подавлением помех, плотность распределения вероятностей которых имеет более «длинные» хвосты по сравнению с нормальным распределением. Одним из наиболее распространенных методов для устранения указанных помех является медианная фильтрация и ее различные модификации [1—3]. Известные способы выполнения медианной фильтрации используют операцию поиска медианного отсчета внутри апертуры. Аппаратурная реализация этой операции достаточно сложна [4].

Указанный недостаток можно устранить за счет предложенной поразрядной реализации медианной фильтрации [5]. При этом вместо поиска медианного значения выполняются лишь мажоритарные преобразования в параллельных последовательностях бинарных кодов, причем в зависимости от динамики изменения полезного сигнала и соотношения сигнал/шум целесообразно использовать различные по сложности способы поразрядного мажоритарного преобразования. Сигнал в каждый момент времени представляет собой параллельный натуральный двоичный код, формируемый после операции аналого-цифрового преобразования.

Важной особенностью данного метода при больших соотношениях сигнал/шум (от 15—20 дБ и выше) является возможность упрощения его реализации посредством исключения из преобразований последовательностей кодов старших разрядов, на которые не влияет шум.

Схема включения поразрядного мажоритарного преобразователя бинарных кодов в тракт преобразования аналоговых сигналов в цифровые показана на рис. 1.

Рассмотрим далее возможные способы поразрядного мажоритарного преобразования бинарных кодов, близкого по статистическим свойствам к медианной фильтрации.

Наиболее прост в реализации способ, описанный в [6]. Он применим при условии, что изменение полезного сигнала на одну кодовую позицию происходит за время не менее длительности половины тактов апертуры фильтра (количество анализируемых в каждом такте преобразования кодов). Способ заключается в следующем.

1. Преобразование осуществляется одновременно во всех подверженных влиянию помех младших разрядах.

2. В каждом из этих разрядов преобразованию подвергают значения кодов в $L = 2m + 1$ последовательных тактах. Эти L значений образуют L -разрядный последовательный код, который обновляется на каждом такте за счет отбрасывания первого значения кода и включения значения кода из очередного такта. В i -м такте преобразования используются коды $(i - L + 1)$, $(i - L + 2)$, ..., i -го тактов.

3. Помеходавление обеспечивается за счет сравнения значений кодов в L тактах и формирования выходного кода данного разряда, равного значениям $(m + 1)$ из L рассматриваемых кодов.

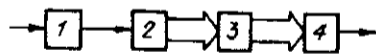


Рис. 1. Схема включения поразрядного мажоритарного преобразователя бинарных кодов в тракт преобразования аналоговых сигналов в цифровые:
1 — датчик, 2 — АЦП, 3 — поразрядный мажоритарный преобразователь, 4 — устройство цифровой обработки сигналов

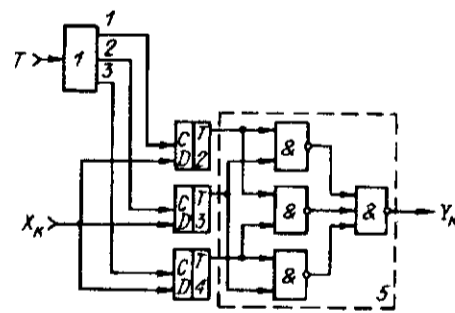


Рис. 2. Схема мажоритарного преобразователя одного разряда:
1 — распределитель импульсов, 2—4 — D-триггеры, 5 — мажоритарный элемент, T — шина тактовых импульсов, x_k, y_k — входная и выходная линии k -го разряда

4. Данное преобразование целесообразно производить итерационно до полного прекращения изменений в сигнале при фильтрации.

Схема устройства, реализующего данный способ при $L = 3$, приведена на рис. 2.

Для повышения помехоустойчивости поразрядного мажоритарного преобразования предложен способ с обратной связью [5, 7]. В этом случае в каждом i -м такте преобразования при глубине обратной связи в l отсчетов значение $(i - L + l + 1)$ -го кода входной последовательности заменяют значением i -го кода выходной последовательности. Схема устройства, реализующего данный способ при $L = 3$, $l = 1$, показана на рис. 3.

Наряду с введением обратной связи, повышение помехоустойчивости поразрядного мажоритарного преобразования достигается посредством использования кодов Грея. Суть заключается в следующем:

— в подверженных влиянию помех M младших разрядах до поразрядного мажоритарного преобразования осуществляют операцию преобразования прямого параллельного двоичного кода в параллельный код Грея;

— после поразрядного мажоритарного преобразования выходной сигнал из параллельного M -разрядного кода Грея преобразуют в прямой параллельный двоичный код.

Помехоустойчивость преобразования повышается за счет того, что случайные помехи в сигнале, преобразованном из прямого параллельного двоичного кода в параллельный двоичный код Грея, искажают меньшее число разрядов.

Данное преобразование реализуется с помощью устройства, схема которого приведена на рис. 4.

Если полезный сигнал изменяется за время менее длительности половины тактов апертюры $L = 2m + 1$ фильтра, то у рассмотренных выше способов возникает динамическая погрешность, обусловленная тем, что не учитывается взаимное расположение кодов разных разрядов. Эта погрешность устраняется с помощью коррекции кодов с глубиной r разрядов, состоящей в следующем [5, 8]:

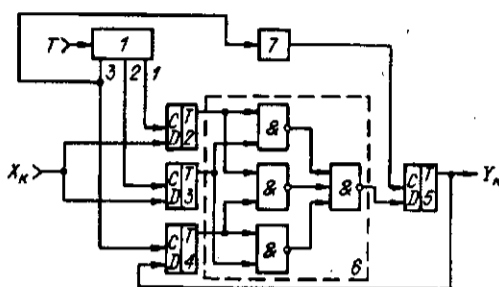


Рис. 3. Схема мажоритарного преобразователя одного разряда с обратной связью:

1 — распределитель импульсов, 2–5 — D-триггеры, 6 — мажоритарный элемент, 7 — элемент задержки

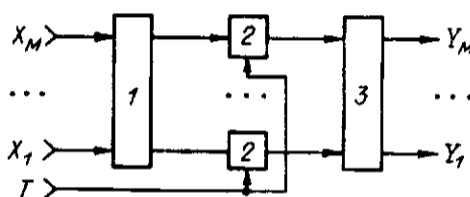


Рис. 4. Схема мажоритарного преобразователя на основе кода Грея:

1 — преобразователь прямого двоичного кода в код Грея, 2 — мажоритарный преобразователь одного разряда, 3 — преобразователь кода Грея в прямой двоичный код

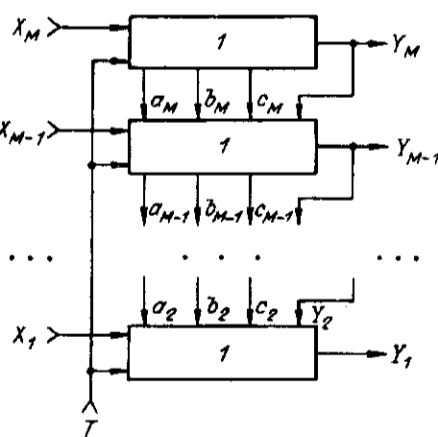


Рис. 5. Схема поразрядного мажоритарного преобразователя с глубиной коррекции, равной одному разряду:

1 — мажоритарный преобразователь одного разряда, a , b , c — шины переноса

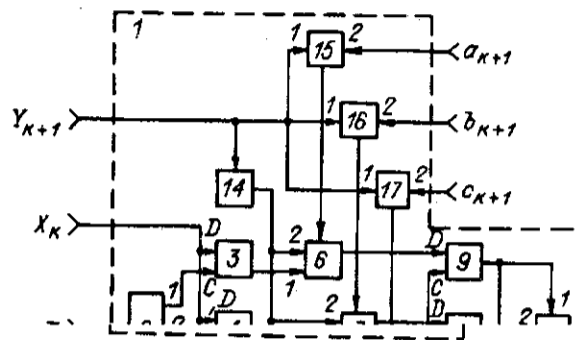


Рис. 6. Схема мажоритарного преобразователя одного разряда с глубиной коррекции, равной одному разряду:

1 — мажоритарный преобразователь одного разряда, 2 — распределитель импульсов, 3—5, 9—11 — *D*-триггеры, 6—8 — коммутаторы, 12 — элемент задержки, 13 — мажоритарный элемент, 14 — инвертор, 15—17 — элементы «исключающее ИЛИ»

— если значения подвергающихся сравнению на *i*-м такте кодов *j*-го разряда не совпадают, то выделяют такты тех кодов, значения которых оказались в меньшинстве;

— на время действия *i*-го такта заменяют значения кодов в выделенных тактах у *r* последовательностей, начиная с ближайшего младшего разряда, на инверсное значение сформированного в *i*-м такте выходного кода *j*-го разряда.

Варьируя глубину коррекции *r*, можно получать различную степень подавления помех. Схема включения поразрядного мажоритарного преобразователя с глубиной коррекции $r = 1$ в тракт преобразования аналоговых сигналов в цифровые показана на рис. 5. Мажоритарный преобразователь для фильтрации одной последовательности кодов *k*-го разряда при $L = 3$, $r = 1$ приведен на рис. 6.

Рассмотренные выше мажоритарные преобразователи имели апертуру $L = 3$. Операция задержки бинарных кодов у них реализована на *D*-триггерах, а сравнение уровней кодов — на мажоритарном элементе. При увеличении апертуры *L* целесообразно изменить реализацию указанных операций, а именно задержку кодов производить сдвиговыми регистрами, а сравнение уровней кодов выполнять в счетчике.

Для расширения функциональных возможностей целесообразно, чтобы мажоритарный преобразователь мог варьировать апертуру *L*. На рис. 7 показана схема устройства, которое имеет три различных значения апертуры: $L = 3$; 5 и 7.

С учетом изложенного видно, что метод поразрядного мажоритар-

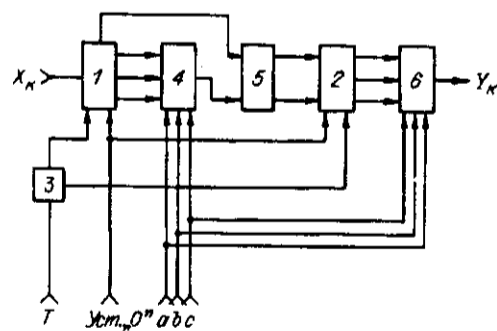


Рис. 7. Схема мажоритарного преобразователя одного разряда с переменной апертурой:

1 — сдвиговой регистр, 2 — реверсивный сдвиговой регистр, 3 — формирователь импульсов, 4, 6 — коммутаторы, 5 — логический преобразователь, а, б, в — шины управления

Таблица 1

L	$\epsilon = 0; \sigma_x^2 = 1$		$\epsilon = 0,1; \sigma_x^2 = 1,8$		$\epsilon = 0,2; \sigma_x^2 = 2,6$		$\epsilon = 0,3; \sigma_x^2 = 3,4$	
	σ_{y1}^2	σ_{y3}^2	σ_{y1}^2	σ_{y3}^2	σ_{y1}^2	σ_{y3}^2	σ_{y1}^2	σ_{y3}^2
3	0,449	0,386	0,624	0,542	0,852	0,744	1,198	1,046
5	0,287	0,219	0,363	0,288	0,459	0,351	0,647	0,447
7	0,205	0,143	0,253	0,183	0,311	0,215	0,387	0,272
9	0,157	0,110	0,190	0,133	0,226	0,155	0,291	0,196
11	0,126	0,087	0,149	0,103	0,177	0,120	0,234	0,152

ного преобразования бинарных кодов реализуется несколькими способами за счет введения обратной связи с различной глубиной (от 0 до m), введения операций преобразования из прямого двоичного кода в код Грея и обратно, преобразования последовательностей бинарных кодов в нескольких младших разрядах (от 1 до M , где M — общее число разрядов), варьирования апертуры фильтра и итерационного применения. Варьируя ими, можно выбрать наилучший по помехоустойчивости, динамике полезного сигнала, соотношению сигнал/шум и простоте реализации нелинейный фильтр.

Рассмотрим статистические свойства поразрядного мажоритарного преобразования бинарных кодов. В качестве примера исследуем свойства поразрядного мажоритарного преобразования с коррекцией кодов во всех младших разрядах. Общее число разрядов зададим $M = 12$. Распределение входного

Таблица 2

ϵ	L	Число итераций	Нормированная корреляционная функция $R(k\Delta)$					
			$R(\Delta)$	$R(2\Delta)$	$R(3\Delta)$	$R(4\Delta)$	$R(5\Delta)$	$R(6\Delta)$
0	3	1	0,537	0,253	-0,012	0,001	—	—
		3	0,681	0,305	0,095	0,024	—	—
	5	1	0,672	0,486	0,290	0,130	-0,019	-0,016
		3	0,850	0,662	0,444	0,261	0,126	0,052
0,1	3	1	0,535	0,236	-0,010	0,005	—	—
		3	0,667	0,285	0,086	0,024	—	—
	5	1	0,679	0,493	0,281	0,136	-0,014	-0,008
		3	0,844	0,652	0,427	0,250	0,124	0,053
0,2	3	1	0,526	0,220	-0,016	0,006	—	—
		3	0,663	0,271	0,082	0,030	—	—
	5	1	0,662	0,478	0,278	0,133	-0,022	-0,011
		3	0,843	0,648	0,417	0,232	0,107	0,037
0,3	3	1	0,513	0,186	-0,004	-0,001	—	—
		3	0,633	0,220	0,048	0,022	—	—
	5	1	0,623	0,431	0,246	0,119	-0,019	0,004
		3	0,839	0,638	0,404	0,229	0,113	0,051

сигнала зададим в виде смеси двух нормальных распределений с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $\sigma_1^2 = 1$, $\sigma_2^2 = 9$:

$$f_\varepsilon(x) = (1 - \varepsilon)N(0, 1) + \varepsilon N(0, 9),$$

где ε — вероятность появления отсчетов с засоряющим законом распределения $N(0, 9)$.

В табл. 1 даны значения дисперсий входного сигнала σ_x^2 и преобразованных сигналов после одной ($\sigma_{y_1}^2$) и трех ($\sigma_{y_3}^2$) итераций для апертур $L = 3; 5; 7; 9; 11$ в зависимости от вероятности ε . В табл. 2 приведены оценки нормированных корреляционных функций преобразованных сигналов при различных вероятностях ε для апертур $L = 3; 5$. Объем выборки данных задавался равным 2500 отсчетам.

Анализ полученных результатов показывает, что рассмотренный способ поразрядного мажоритарного преобразования имеет практически те же статистические свойства, что и медианная фильтрация, но выигрывает в простоте аппаратной реализации.

ВЫВОДЫ

Предложен новый метод нелинейной фильтрации данных на основе поразрядного мажоритарного преобразования бинарных кодов, имеющий по сравнению с медианной фильтрацией более простую аппаратную реализацию.

Разработаны схемы устройств для реализации нескольких способов поразрядного мажоритарного преобразования бинарных кодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yong H. L., Kassam S. A. Generated median filtering and related nonlinear filtering techniques // IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Proces.—1985.—33, N 3.—P. 672.
2. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры /Под ред. Т. С. Хуанга.—М.: Радио и связь, 1984.
3. Бабкин Н. В., Макшанов А. В., Мусаев А. А. Робастные методы статистического анализа навигационной информации /Под ред. И. Б. Челпанова.—Л.: ЦНИИ «Румб», 1985.
4. Очин Е. Ф. Вычислительные системы обработки изображений.—Л.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Тырсин А. Н., Семенычев В. К. Способы подавления помех на основе поразрядного мажоритарного преобразования // Теория и практика проектирования микропроцессорных систем: Сб. науч. тр.—Куйбышев: Куйбышев. политехн. ин-т, 1989.
6. А. с. 1243119 СССР. Способ преобразования последовательности прямоугольных импульсов напряжения и устройство для его осуществления /Ю. С. Дмитриев, А. Н. Тырсин.—Заявл. 09.11.83; Оpubл. 07.07.86, Бюл. № 25.
7. А. с. 1624673 СССР. Устройство для преобразования последовательности импульсов / А. Н. Тырсин, В. К. Семенычев, Ю. С. Дмитриев.—Заявл. 01.07.88; Оpubл. 30.01.91, Бюл. № 4.
8. А. с. 1622931 СССР. Способ преобразования последовательностей прямоугольных импульсов и устройство для его осуществления /А. Н. Тырсин, Ю. С. Дмитриев.—Заявл. 06.06.88; Оpubл. 23. 01.91, Бюл. № 3.

Поступило в редакцию 24 октября 1991 г.