

М. А. Вилькоцкий, Г. П. Личко
(Минск)

**АЛГОРИТМ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
БЛИЖНИХ ПОЛЕЙ АНТЕННЫХ СИСТЕМ**

В настоящее время при цифровой обработке сигналов применяется класс нелинейных алгоритмов обработки, называемых медианной фильтрацией [1]. Важным свойством медианных фильтров, отличающим их от других классов алгоритмов, является способность сохранять без искажений монотонно изменяющиеся участки сигнала с длительностью, превышающей полудлину апертуры фильтра. В результате медианные фильтры с успехом применяются для обнаружения и удаления импульсных помех при цифровой обработке речи [2] и изображений [3]. Представляет интерес применение медианной фильтрации для обработки результатов голографических измерений ближних полей антенных систем с целью удаления импульсных помех. Для успешного решения этой задачи с использованием, например, алгоритма, представленного в [4], необходимо обеспечить малый уровень искажений обрабатываемого сигнала в отсутствие импульсных помех.

Покажем, что применение классического медианного фильтра к обработке результатов голографических измерений ближних полей антенных систем вносит значительные искажения. Так как алгоритм медианной фильтрации является нелинейным, приведем результаты качественного анализа влияния медианной фильтрации на конечные результаты.

Пусть при голографических измерениях ближних полей антенных систем осуществляются раздельно регистрация и передача каждой из квадратур амплитудно-фазового распределения (АФР). В таком случае медианная фильтрация выполняется независимо для каждого из каналов.

Так как результаты измерений АФР в основном используются для спектрального анализа, например восстановления диаграмм направленности (ДН) антенных систем, будем в качестве критерия вносимых искажений использовать изменение уровня боковых лепестков ДН.

В таблице даны уровни боковых лепестков ДН u_1, u_{11}, u_2, u_{22} , полученные при восстановлении ДН по результатам медианной фильтрации смоделированного АФР. Из приведенных данных следует, что медианная фильтрация вносит значительные искажения ДН даже при минимальных длинах апертуры фильтра. Главной причиной этого явля-

Вид апертуры	Длина апертуры	u_1	u_{11}	u_2	u_{22}
Без фильтра	—	19,20	19,20	19,20	19,20
Линейная по столбцу	3	27,28	25,90	19,95	19,95
Линейная по строке	3	19,95	19,95	27,28	25,90
Сепарабельная (строка, столбец)	3+3	28,49	26,63	32,22	29,59
Крестообразная	3×3	21,18	20,89	21,18	20,89
Прямоугольная	3 3	28,39	26,58	28,39	26,58
Прямоугольная рамка	3 3	27,13	25,51	27,13	25,51
Круг (диаметр)	3	21,18	20,89	21,18	20,89
Кольцо (диаметр, толщина)	3(2)	24,42	23,71	24,42	23,71
Предлагаемый алгоритм	3	19,50	19,50	19,36	19,48

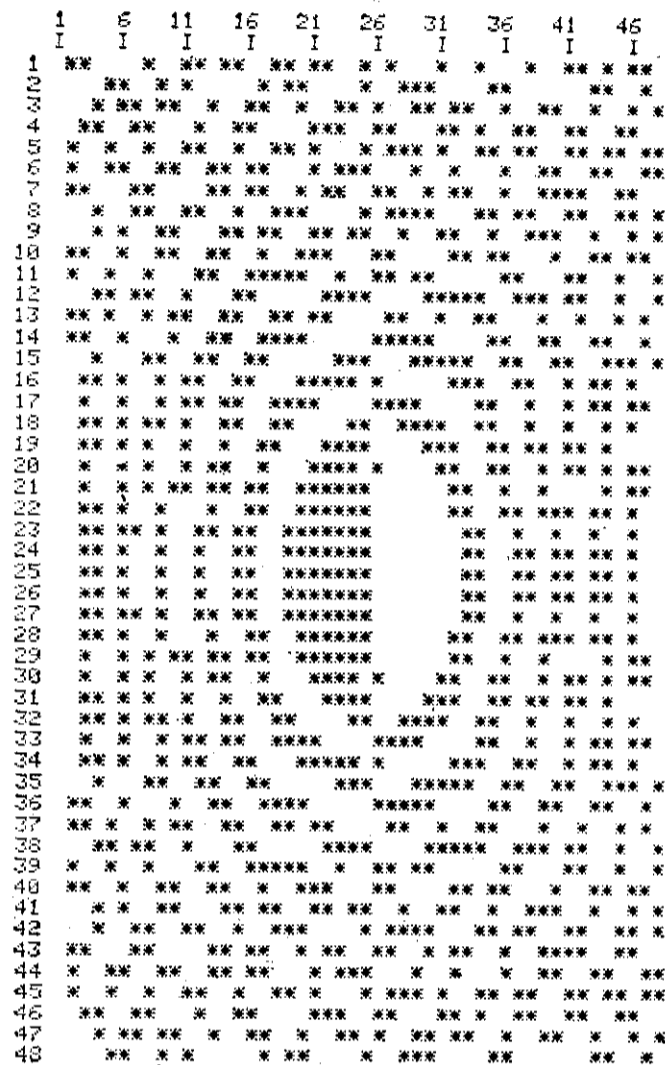


Рис. 1

ются искажения экстремальных точек в обрабатываемом АФР, обусловленные свойствами классического медианного фильтра, в то время как типичное АФР характеризуется наличием регулярной структуры таких точек.

Примером наличия регулярной структуры экстремальных точек в АФР является рис. 1, на котором представлено АФР антенной системы в виде областей с положительным (знак «*») и отрицательным (пробел) градиентами.

Так как измерения ближних полей осуществляются с использованием растровой системы сканирования и на частоте дискретизации, близкой к минимально допустимой, то применяемые медианные фильтры должны иметь линейную апертуру минимальной длины.

Приведем алгоритм медианной фильтрации, вносящий значительно меньший уровень пространственных искажений по сравнению с классическим медианным фильтром при обработке результатов голографических измерений.

Пусть центр линейной апертуры медианного фильтра длиной три отсчета находится в точке j обрабатываемого массива f . Алгоритм за-

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МОДУЛЯ В ОТН. ЕДИНИЦАХ
 МАСШТАБ ПЕЧАТИ : 0.09 ОЕ
 НАЧАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ : 1.00 ОЕ
 ШКАЛА СООТВЕТСТВИЯ УРОВНЕЙ СИМВОЛАМ:
 1=# 2=Ж 3=X 4=% 5=/ 6== 7=- 8=:

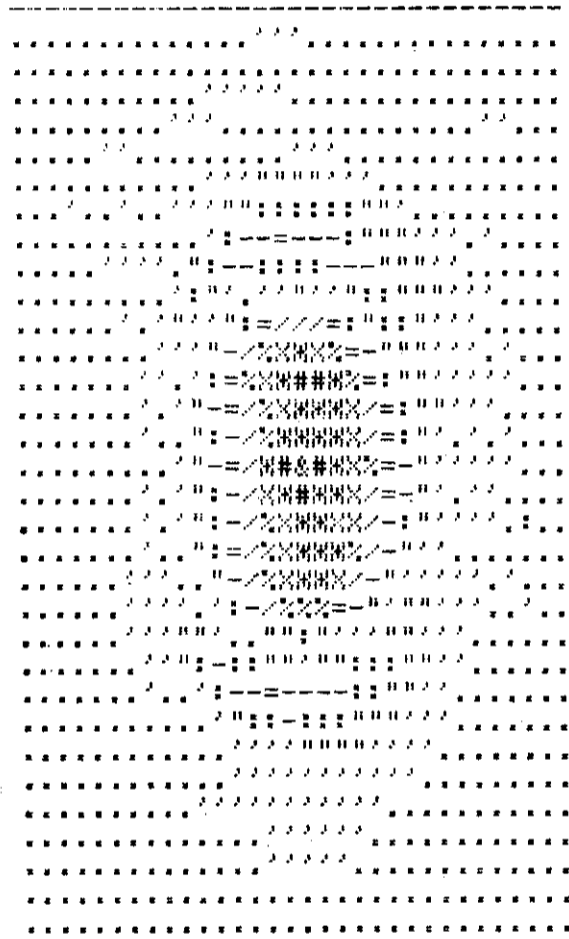


Рис. 2

включается в выполнении следующих операций для каждой строки или столбца массива:

1. Определяются начальные значения медиан M_1, M_2, M_3 по правилу

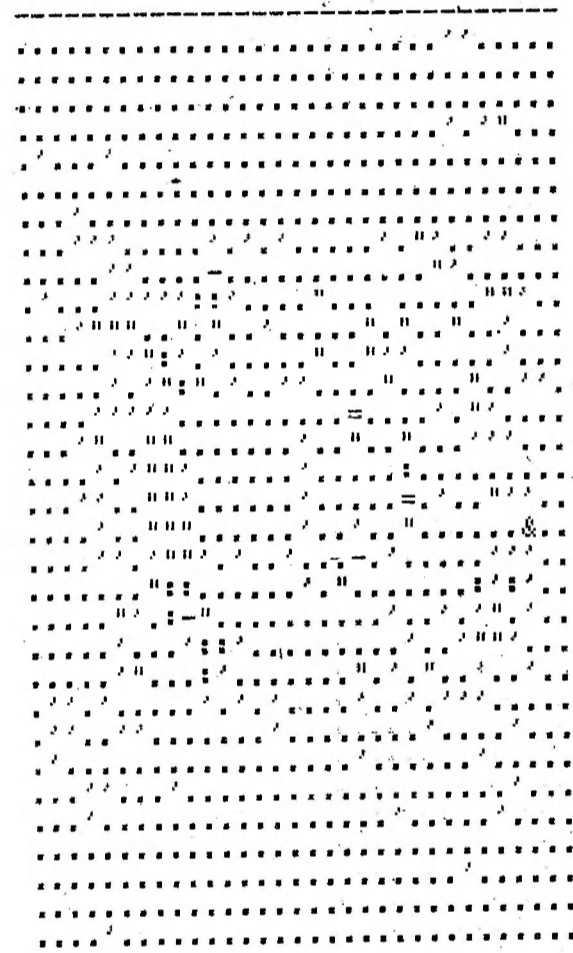
$$\begin{aligned} M_1 &= M\{f(j-2), f(j-1), f(j)\}; \\ M_2 &= M\{f(j-1), f(j), f(j+1)\}; \\ M_3 &= M\{f(j), f(j+1), f(j+2)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где M — медиана последовательности отсчетов, находящихся в фигурных скобках, и значения индикаторов I_1, I_2, I_3 с использованием условий:

$$I_1 = \begin{cases} 1 & \text{для } f(j-2) \leq M_1 \text{ и } M_1 = f(j-1); \\ -1 & \text{для } M_1 = f(j-1) \text{ и } M_1 < f(j-2); \\ 0 & \text{для других } M_1; \end{cases}$$

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МОДУЛЯ В ОТН. ЕДИНИЦАХ
 МАСШТАБ ПЕЧАТИ : 0.09 OE
 НАЧАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ : 1.00 OE
 ШКАЛА СООТВЕТСТВИЯ УРОВНЕЙ СИМВОЛАМ:
 1=# 2=* 3=X 4=% 5=/ 6== 7=- 8=:
 9=" 10=' 11=.

ЗНАЧЕНИЕ МАКСИМУМА: 0.1910E+03
 КООРДИНАТЫ МАКСИМУМА : СТОЛБЕЦ 30 СТРОКА 10



$$I_2 = \begin{cases} 1 & \text{для } M_2 = f(j) \text{ и } M_2 \geq f(j-1); \\ -1 & \text{для } M_2 = f(j) \text{ и } M_2 < f(j-2); \\ 0 & \text{для других } M_2; \end{cases} \quad (2)$$

$$I_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } M_3 = f(j+1) \text{ и } M_3 \geq f(j) \text{ и } M_3 \neq f(j+2); \\ -1 & \text{для } M_3 = f(j+1) \text{ и } M_3 < f(j) \text{ и } M_3 \neq f(j+2); \\ 0 & \text{для других } M_3. \end{cases}$$

2. Если значения индикаторов не удовлетворяют следующим условиям:

$$I_2 = 1 \text{ при произвольных } I_1, I_3; \quad (3)$$

$$I_2 = 0 \text{ и } I_1 \neq I_3 \neq 0, \quad (4)$$

Доказательство. В соответствии с определением данного медианного фильтра имеем для гармонического сигнала в точках экстремума следующие значения индикаторов: $I_2 = 0$, $I_1 = +1$, $I_3 = -1$ или $I_2 = 0$, $I_1 = -1$, $I_3 = +1$. Следовательно, условие (4) выполняется и значение последовательности $f(j)$ не заменяется на медиану.

Свойство 2. Медианный фильтр сохраняет монотонно изменяющиеся участки без изменений.

Доказательство. Монотонно изменяющийся участок характеризуется значением $I_2 = 0$, и, следовательно, медианная фильтрация не осуществляется, так как выполняется условие (3).

Свойство 3. Данный медианный фильтр устраняет импульсные шумы на монотонных участках.

Доказательство. При наличии импульсного шума имеем: $I_2 = 0$, I_1 или I_3 равны нулю. Следовательно, в точке $f(j)$ осуществляется замена отсчета на классическую медиану, которая, как известно, устраняет импульсный шум единичной длины при длине апертуры, равной трем отсчетам.

Свойство 4. При осциллирующем характере медианный фильтр ведет себя как классический медианный фильтр.

Доказательство. При осциллирующем характере обрабатываемой последовательности: $I_2 = 0$, I_1 или I_3 равны нулю. В соответствии с определением медианного фильтра имеем обычный медианный фильтр.

Свойство 5. Медианный фильтр не устраняет импульсные шумы в точках экстремумов гармонического сигнала.

Доказательство. В точках экстремумов гармонического сигнала имеем: $I_2 = 0$, $I_1 \neq I_3 \neq 0$, и согласно условию (4) медианная фильтрация не выполняется.

Таким образом, из приведенных свойств предлагаемого медианного фильтра следует, что данный алгоритм медианной фильтрации не будет вносить искажения в зоны смены знака градиентов изменения величины отсчетов. Изложенное иллюстрируют малые величины искажений ДИ, предлагаемые алгоритмом (см. таблицу). В областях, где имеется импульсный шум, новый алгоритм медианной фильтрации, как следует из его свойств, совпадает с обычным алгоритмом медианной фильтрации и, следовательно, есть возможность снижения уровня импульсных шумов посредством применения методики, предложенной в [4].

Приведем результаты обработки реального АФР. На рис. 2, а представлено исходное АФР реальной антенной системы, измеренное с использованием голографических методов; на рис. 2, б — картографическое изображение АФР $G_m = \|\text{Re}(f) - \text{Re}(f_m)\|, |\text{Im}(f) - \text{Im}(f_m)|$ (где f_m — АФР после действия классического медианного фильтра с апертурой длиной, равной трем отсчетам); на рис. 2, в — картографическое изображение АФР $G_n = \|\text{Re}(f) - \text{Re}(f_n)\|, |\text{Im}(f) - \text{Im}(f_n)|$ (где f_n — АФР после действия предлагаемого алгоритма). Из сравнения рис. 2, а — в следует, что число областей изменения АФР медианной фильтрацией значительно уменьшилось и, следовательно, имеется возможность более эффективного применения порогового алгоритма удаления импульсных шумов.

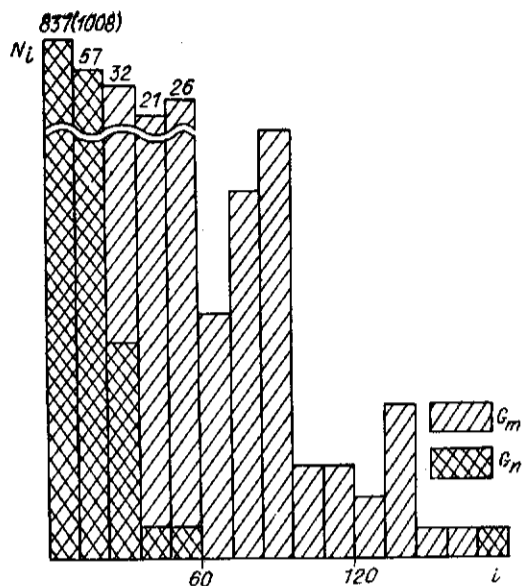


Рис. 3

Правильность последнего утверждения подтверждается рис. 3, на котором представлены гистограммы G_m и G_n соответственно.

Из рис. 3 следует, что после применения нового алгоритма медианной фильтрации удалось значительно улучшить условия выбора порога для удаления импульсных шумов.

Таким образом, в данной работе предложен новый алгоритм медианной фильтрации результатов голографических измерений ближних полей, вносящий меньший уровень искажений и позволяющий с большой эффективностью осуществлять обнаружение и удаление импульсных помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений.— М.: Радио и связь, 1984.
2. Rabiner L. R., Sambur M. E., Schmidt C. E. Applications of a nonlinear smoothing algorithm to speech processing // IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Processing.— 1975.— ASSP-23.— P. 522.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.— Т. 2.
4. Ip H. S., Potter R. J., Lebedev D. S. Impulse noise cleaning by iterative threshold median filtering // Pattern Recogn. Lett.— 1983.— 2, N 2.— P. 89.

Поступила в редакцию 15 июня 1987 г.

УДК 681.327.68 : 778.38

С. А. ДОМБРОВСКИЙ

(Новосибирск)

ДОСТОВЕРНОСТЬ СЧИТЫВАНИЯ В КАНАЛЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ЗУ С ФЛУКТУИРУЮЩИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В [1] проанализирована достоверность считывания двоично-кодированных данных в канале ГЗУ с постоянными параметрами. В таком канале характеристики восстановленных изображений — контраст k и отношение сигнал/шум оптических «1» и «0» — являются неизменными. Показано, что вероятность ошибки считывания отдельной голограммы при типичных значениях ее характеристик ($k = 10$, $(C/Ш)_1 = 5$, $(C/Ш)_0 = 2$) равна $2 \cdot 10^{-10}$.

Экспериментальные данные по фотосчитыванию массивов голограмм дают вероятность ошибки $\sim 10^{-6} - 10^{-7}$, что на несколько порядков хуже [2]. Это объясняется тем, что в реальном канале ГЗУ параметры восстановленных изображений нельзя считать постоянными. Их флуктуации связаны с несовершенством регистрирующей среды (микродофекты) [3], изменением уровня голографических шумов в зависимости от информационного содержания страницы данных [4] и т. д. Однако основные источники искажений голограмм — случайные aberrации и разъюстировки оптической системы [2].

Цель данной статьи — дать оценку достоверности считывания в флуктуирующем канале ГЗУ, когда параметры восстановленных изображений изменяются из-за случайных отклонений восстанавливающего и информационного пучков в плоскости голограммы и фотоматрицы соответственно.

Случайные aberrации пучков, приводящие к искажению характеристик голограмм, связаны с угловым дрейфом диаграммы направленности луча лазера, с тепловой нестабильностью дефлектора [5], с неточностью позиционирования голограммы в зоне считывания, с усадкой