

УДК 621.391.53.08

Г. Р. Горский, Л. Ф. Чукин  
(Москва)

### ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕСТНОСТИ

В классе линейных фильтров решается задача оптимизации алгоритма восстановления радиолокационных изображений местности, формируемых бортовым радиолокатором переднего обзора. Получены оптимальные алгоритмы восстановления, минимизирующие два показателя качества: дисперсию восстановления и дисперсию привязки. Методом цифрового моделирования проводится оценка эффективности синтезированных алгоритмов по сравнению с известными. Даются рекомендации по применению синтезированных алгоритмов.

При использовании бортовых РЛС переднего и кругового обзора для дистанционного зондирования земной поверхности угловое разрешение, обеспечиваемое антенной системой в азимутальной плоскости, является зачастую недостаточным. Это приводит к пространственному сглаживанию формируемых радиолокационных изображений и снижению эффективности решения задач обнаружения наземных объектов, их идентификации и т. д.

Одним из путей решения этой проблемы и повышения азимутального разрешения РЛС в условиях, когда другие методы, например, синтезирование апертуры антенны, невозможны или неэффективны, является использование алгоритмов восстановления изображений, основанных на решении интегрального уравнения типа свертки.

Известно [1], что в классе линейных алгоритмов оптимальным является винеровский алгоритм восстановления, минимизирующий СКО погрешности восстановления. Коэффициент передачи винеровского фильтра при различных типах помех:

аддитивная помеха

$$H(\omega) = \frac{C(\omega)}{C^2(\omega) + N(\omega)/G(\omega)}, \quad (1)$$

мультипликативная помеха

$$H(\omega) = \frac{m_a G(\omega) C(\omega)}{\int N_a(\omega - \Omega) G(\Omega) C^2(\Omega) d\Omega}, \quad (2)$$

совокупная помеха

$$H(\omega) = \frac{m_a G(\omega) C(\omega)}{C^2(\omega) \int G(\Omega) N_a(\omega - \Omega) d\Omega + N(\omega)}, \quad (3)$$

где  $C(\omega)$  — коэффициент передачи искажающей функции;  $N(\omega)$  — энергетический спектр аддитивной помехи;  $N_a(\omega)$  — энергетический спектр мультипликативной помехи;  $m_a$  — математическое ожидание мультипликативной помехи;  $G(\omega)$  — энергетический спектр радиолокационного изображения.

Исследования показывают [2], что для бортовых РЛС обзора Земли, в том числе и для РЛС переднего и кругового обзора (РЛС ПО и КРО), модель формирования выходного аналога вследствие случайного характера отраженного поверхностью радиосигнала не сводится ни к одному из перечисленных типов помех и имеет вид

$$P^*[x, y] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x - u, y - \omega) C(\omega, u) d\omega du [1 + a(x, y)] + P_{cp} [1 + b(x, y)], \quad (4)$$

где  $C(\omega, u)$  — искажающая функция (функция пространственной селекции РЛС);  $P(x, y)$  — радиолокационное изображение;  $a(x, y)$  — случайный процесс, описывающий нормированные флуктуации типа сигнал/сигнал;  $P_{cp}$  — средняя мощность шума;  $b(x, y)$  — случайный процесс, описывающий нормированные флуктуации типа сигнал/шум и шум/шум.

Математическая модель РЛС (4) представляет с точностью до постоянной  $P_{cp}$  интеграл свертки истинного изображения  $P(x, y)$  с функцией пространственной селекции РЛС  $C(x, y)$ , ограниченность разрешения которой и приводит к сглаживанию изображения, а также включает мультипликативную помеху модуляционного типа и аддитивную помеху.

Модуляционная помеха обусловлена случайным характером отраженного сигнала, а аддитивная — шумами приемного устройства и биениями сигнал/шум, возникающими в нелинейных устройствах канала обработки РЛС.

Ввиду того что разрешающая способность РЛС ПО и КРО в угломестной плоскости обеспечивается разрешением сигнала по дальности и, как правило, на порядок и более выше, чем в азимутальной плоскости, фактически двумерная свертка в (4) вырождается в одномерную

$$P^*(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x - \omega) C(\omega) d\omega [1 + a(x)] + P_{cp} [1 + b(x)] \quad (5)$$

и описывает оценку радиояркости по линии постоянной дальности.

Воспользуемся выражением (5) для синтеза алгоритма восстановления, при этом в качестве критерия оптимизации выберем традиционный — минимум дисперсии погрешности восстановления:

$$\text{Min} \sigma_s^2 = \langle [P_s(x) - P(x)]^2 \rangle, \quad (6)$$

где  $P_s(x)$  — восстановленное изображение.

Оптимальный фильтр будем искать в классе линейного и характеризовать импульсной характеристикой  $h(t)$ :

$$P_s(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P^*(x - t) h(t) dt. \quad (7)$$

Подставим (7) в (6) и с учетом (5) после ряда преобразований получим

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 = & \int_{-\infty}^{\infty} [G(\omega) C^2(\omega) H^2(\omega) + N(\omega) H^2(\omega) + G(\omega) - 2G(\omega) C(\omega) H(\omega) + \\ & + \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega - \Omega) C^2(\omega - \Omega) N_a(\Omega) d\Omega H^2(\omega)] d\omega, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $G(\omega)$  — энергетический спектр изображения  $P(x)$ ;  $C(\omega)$  — коэффициент передачи искажающей функции;  $H(\omega)$  — коэффициент передачи восстанавливающего фильтра;  $N(\omega)$  — спектральная плотность аддитивных шумов (процесса  $b(x)$ );  $N_a(\omega)$  — спектральная плотность процесса  $a(x)$ .

Применяя вариационное исчисление, можно показать, что оптимальный коэффициент передачи восстанавливающего фильтра, обеспечивающий минимум (8), имеет вид:

$$H_{\text{opt}}(\omega) = \frac{C(\omega)}{C^2(\omega) + [N(\omega) + N_s(\omega)]/G(\omega)}, \quad (9)$$

где  $N_s(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega - \Omega)C^2(\omega - \Omega)N_a(\Omega)d\Omega$  — эквивалентная спектральная плотность.

Полученный алгоритм отличается от известных наличием в регуляризирующем члене эквивалентной спектральной плотности  $N_s(\omega)$ , которая представляет собой свертку энергетического спектра сглаженного изображения со спектральной плотностью процесса  $a(x)$  и описывает пространственный спектр флуктуаций типа сигнал/сигнал.

В связи с этим форма АЧХ алгоритма (9) в значительной степени зависит от характера  $N_a(\omega)$ , тем более что обычно в РЛС отношение сигнал/шум обеспечивается достаточно большим, и поэтому мощность аддитивных шумов существенно меньше, чем мультипликативных. Сама форма  $N_a(\omega)$  сильно меняется в зависимости от способа обработки и сканирования антенны РЛС в азимутальной плоскости.

В этом смысле интересны два крайних случая:

- 1) независимые флуктуации оценок в соседних элементах селекции РЛС;
- 2) зависимые флуктуации оценок в соседних элементах селекции РЛС.

В первом случае  $N_a(\omega) = N_a$ , а  $N_s(\omega)$  представляет собой эквивалентный белый шум и алгоритм восстановления сводится к (1), но при суммарной спектральной плотности  $N_s = N(\omega) + N_s$ .

Во втором случае при высокой корреляции флуктуаций оценок  $N_s(\omega) \sim \sim G(\omega)C^2(\omega)$  и спектр эквивалентных флуктуаций существенно обуживается, что приводит к расширению полосы восстановления по сравнению с первым случаем. На рис. 1 для сравнения представлены АЧХ оптимального восстанавливающего фильтра для просто аддитивной помехи со спектральной плотностью  $N(\omega)$  и двух крайних рассмотренных случаев.

Исходя из рассмотренного можно сделать вывод о том, что с точки зрения более эффективного восстановления радиолокационных изображений в РЛС предпочтительно осуществлять такую обработку, при которой выполняется условие высокой корреляции флуктуаций.

Иногда возникает необходимость использования других критериев оптимизации, учитывающих особенности потребителей восстанавливаемой информации, тем более что часто после восстановления решается задача идентификации объектов (например, с помощью РЛС ПО или КРО выполняется навигационная привязка к радиолокационному ориентиру (РЛО)). В этом случае целесообразно использовать в качестве критерия качества показатели эффективности решения конечной задачи, например дисперсию погрешности привязки.

Выберем в качестве критерия качества отношение дисперсии

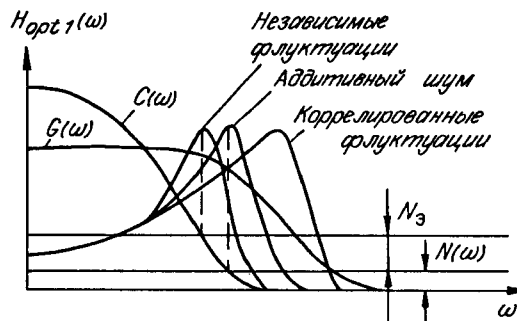


Рис. 1

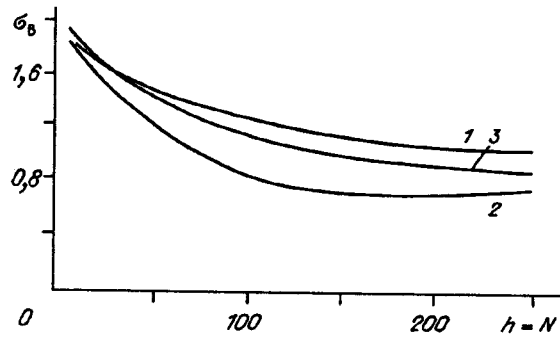


Рис. 2

погрешности восстановления, определяемой (6), ко второй производной взаимно-корреляционной функции восстановленного  $P_v(x)$  и неискаженного  $P(x)$  изображений, последнее может рассматриваться как опорное:

$$\text{Minf} = \frac{\sigma_v^2}{R^*}, \quad (10)$$

где  $R = \langle [P_v(x)P(x)] \rangle$ .

Выполняя преобразования, аналогичные проведенным ранее, может быть получено выражение для коэффициента передачи оптимального восстанавливающего фильтра, минимизирующего (10):

$$H_{\text{opt}}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{C^2(\omega) + [N(\omega) + N_s(\omega)]/G(\omega)}}. \quad (11)$$

Полученный алгоритм совпадает с алгоритмом гомоморфной фильтрации, который уравнивает энергетический спектр восстановленного изображения с априорно известным [1], но в отличие от него является оптимальным.

С целью оценки эффективности синтезированных алгоритмов было проведено цифровое моделирование алгоритмов восстановления радиолокационного изображения, формируемого РЛС ПО. На рис. 2 и 3 представлены соответственно зависимости СКО восстановления и СКО оценки системы привязки к РЛО от отношения сигнал/шум, обеспечиваемые винеровским опти-

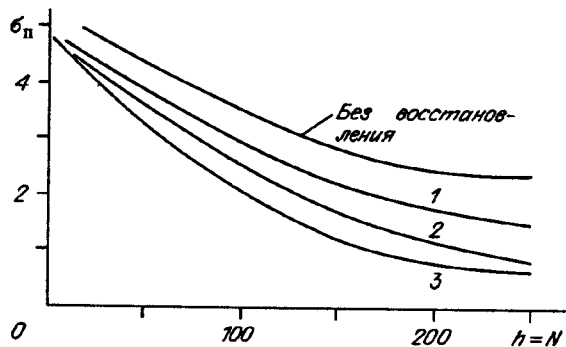


Рис. 3

мальным фильтром (кривая 1), синтезированным фильтром (9) (кривая 2) и синтезированным фильтром (11) (кривая 3). При моделировании полагалось, что параметры некогерентного усреднения сигнала  $N = h$ .

Из представленных графиков видно, что синтезированные алгоритмы обеспечивают по сравнению с винеровскими фильтрами повышение обоих показателей качества: СКО восстановления и погрешности привязки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986.
2. Радиолокационные методы исследования Земли /Под ред. Ю. А. Мельника. М.: Сов. радио, 1980.
3. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976.

*Поступила в редакцию 4 апреля 1994 г.*

---

---

**Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!**