

Алгоритм повышения контрастности радиоизображения на основе минимально-параметрического моделирования 77-30569/251783

11, ноябрь 2011

Нефедов С. И.

УДК 621.396.96

НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана
nefedov@bmstu.ru.

При создании систем радиовидения важное место занимают алгоритмы построения двумерных радиоизображений объектов. Разрабатываемая в НИИ РЭТ радиолокационная станция радиовидения космических аппаратов РЛС РВ МГТУ [1, 2] будет использовать программное обеспечение, полученное на основе алгоритмов, предлагаемых в [3 4]. Исследования показывают, что параметры РЛС РВ МГТУ и условия наблюдения ею спутников не позволяют ожидать высокой контрастности получаемых изображений. В данной работе предлагается методика повышения контрастности, основанная на минимально-параметрическом моделировании, которая может существенно повысить эффективность работы станции.

Разработанный математический аппарат предполагает применение унифицированного подхода на основе преобразования Фурье как для сжатия сигнала по продольной, так и по поперечной координате. Подробный алгоритм представлен в [3, 4], в данной работе дается его краткое описание.

Положим, что наблюдаемый объект движется по траектории, описываемой некоторой временной зависимостью $R_0(t)$. Проведем разложение данной зависимости в ряд Тейлора относительно момента времени $t = T/2$.

$$R'_0(t) \approx R_0(t/2) + \gamma \cdot (t - T/2) + \eta \cdot (t - T/2)^2, \quad (1)$$

где $R_0(T/2)$ - расстояние между РЛС и целью в момент времени $t = T/2$, $\left. \frac{dR_0(t)}{dt} \right|_{t=T/2} = \gamma$,

$\left. \frac{d^2 R_0(t)}{dt^2} \right|_{t=T/2} = \eta$ - радиальная скорость и радиальное ускорение цели относительно РЛС в

момент времени $t = T/2$. Значения этих параметров вычисляются на основе радиолокационных измерений во время полета цели.

Пусть на входе обработки, предназначенной для синтеза изображения, имеется когерентная пачка длительностью T , состоящая из набора одиночных импульсов полосы Δf , отраженная наблюдаемым объектом. Представим этот сигнал в виде функции $U(t, f)$ времени и частоты флуктуаций комплексной огибающей.

Для получения дальностного портрета цели принятый сигнал $U(t, f)$ умножается на опорную функцию $\exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f}{c} \cdot R_0(T/2)\right)$

$$U_1(t, f) = U(t, f) \cdot \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f}{c} \cdot R_0(T/2)\right), \quad (2)$$

компенсирующую сдвиг радиолокационного изображения из-за смещения центра масс цели при ее движении по траектории. Далее синтез дальностного портрета сводится к преобразованию Фурье

$$Rd(t, z_2) = \int_{f_0 - \frac{F}{2}}^{f_0 + \frac{F}{2}} \frac{U_1(t, f)}{F} \cdot \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f}{c} \cdot z_2\right) df. \quad (3)$$

В дискретном виде формула (3) с учетом (1) для фиксированного момента времени $t_{n=const}$ записывается в следующем виде:

$$Rd_{n=const, n_1} = \sqrt{N_1 - 1} \cdot \Delta f \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \left[\frac{U_{n=const, n_1}}{F} \cdot \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f_{n_1}}{c} \cdot \Delta_r \cdot n_1\right) \right], \quad (4)$$

где Δ_r - разрешающая способность по дальности,

и вычисляется с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье, $N_1 = 2^k$. При этом получается вектор комплексных значений распределения отражательной характеристики цели по дальности.

Высокое разрешение по азимуту достигается за счет использования длительного по времени когерентного сигнала, накопленного в процессе наблюдения за перемещающейся целью.

Для получения азимутального портрета сигнал умножается на опорную функцию вида

$$h(t, \gamma, \eta) = \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f_0}{c} \cdot (R_0 + \gamma \cdot t + \eta \cdot t^2)\right), \quad (5)$$

устраняющую квадратичное изменение фазы. Далее, как и для случая дальностного портрета, синтез азимутального портрета сводится к преобразованию Фурье

$$Ra(f_d, \gamma, \eta) = \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} U(t, f_0) \cdot h(t, \gamma, \eta) \cdot \exp(-i \cdot f_d \cdot t) dt, \quad (6)$$

где f_d - доплеровский сдвиг частоты отраженного сигнала, который зависит от азимутальной координаты z_1 и определяется по известному соотношению.

В дискретном виде формула (6) с учетом (1) для фиксированного значения частоты $f_{n_1=const}$ записывается в следующем виде

$$Ra_{n, n_1=const} = \sqrt{N-1} \cdot \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{U_{n, n_1=const}}{T} \cdot h(t_n, \gamma, \eta) \cdot \exp(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot f_d \cdot t_n \cdot \Delta_a \cdot n) \right], \quad (7)$$

где Δ_a - разрешающая способность по поперечной координате,

и вычисляется с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье, $N = 2^k$. При этом получается вектор комплексных значений распределения отражательной характеристики цели по поперечной координате.

Для построения двумерного радиоизображения воспользуемся двумерным преобразованием Фурье в его интегральной (8) и дискретной (9) формах записи

$$Rad(z_1, z_2) = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{f_0-F/2}^{f_0+F/2} \frac{U_1(t, f)}{T \cdot F} \cdot h(t, \gamma, \eta) \cdot \exp(-i \cdot f_d \cdot t) \cdot \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f}{c} \cdot z_2\right) df dt, \quad (8)$$

$$Rad = \Delta f \cdot \Delta t \cdot N \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \left[\frac{U_{n, n_1}}{T \cdot F} \cdot h(t_n, \gamma', \eta') \cdot \exp(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot f_d \cdot \Delta_a \cdot n) \cdot \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f_{n_1}}{c} \cdot \Delta_r \cdot n_1\right) \right]. \quad (9)$$

Вычисление (4.10) реализуется с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье, при этом $N = N_1 = 2^k$.

В качестве примера рассмотрим модель, состоящую из совокупности цилиндров, расположенных в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. На рис. 2а приведено ее двумерное радиоизображение.

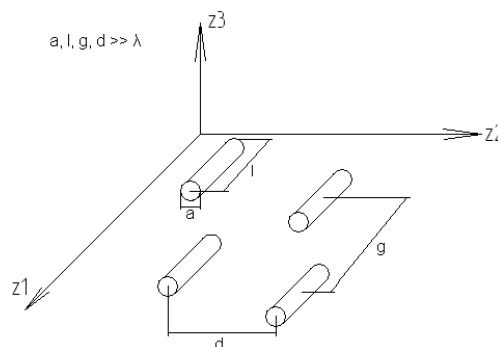


Рис. 1. Геометрическая модель для исследования радиоизображения

Описанный выше метод является работоспособным в некоторых пределах и применимым при решении ряда практических задач. В работе предлагается методика обработки информации, основанная на минимально-параметрическом модельном описании, позволяющая несколько повысить эффективность рассмотренного метода.

Суть минимально-параметрического подхода к синтезированию будет заключаться в подборе и применении таких ядер преобразования, которые наиболее точно отражают суть эффекта, применяемого при получении изображения. В алгоритмах автофокусировки, рассмотренных выше, применяются линейная и квадратичная модели движения объектов. То есть рассматриваются лишь характеристики преобразования, связанные с траекторными параметрами движения наблюдаемых целей. Можно рассмотреть эффект, связанный с более детальным описанием характера рассеиваемого объекта, и тем самым повысить контрастность изображения. Введем описание объекта через блестящую точку. Будем считать, что каждая из блестящих точек описывается как

$$\text{функция } B(t, f) = \frac{\sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l \cdot \cos(\vartheta(t))\right)}{\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l \cdot \cos(\vartheta(t))}, \text{ где } f - \text{частота, } c - \text{скорость света, } \vartheta(t) - \text{угол}$$

между линией визирования и вектором скорости наблюдаемого объекта, l - оценка геометрического размера объекта. В большинстве случаев это действительно так и соответствует электродинамическому описанию сферического изотропно отражающего объекта. Тогда будем считать минимально-параметрической моделью объекта модель движения, характеризуемую полиномом второй степени, точечным описанием изображения объекта и описанием каждой из блестящих точек изображения в виде изотропного источника вида $B(t, f)$. Тогда выражения (8) и (9) могут быть представлены в виде (10) и (11) соответственно.

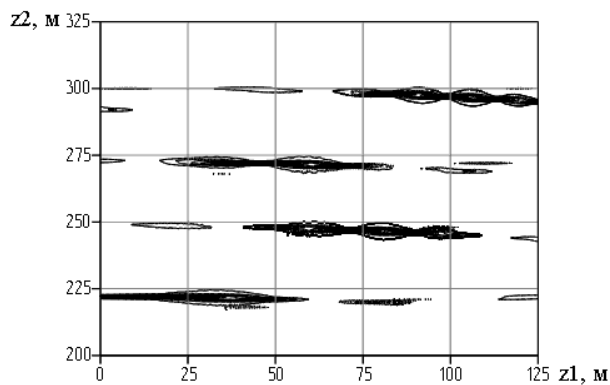
$$\begin{aligned} \text{Rad}(z_1, z_2) = & \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \int_{f_0 - \frac{F}{2}}^{f_0 + \frac{F}{2}} \frac{U_1(t, f)}{T \cdot F} \cdot h(t, \gamma, \eta) \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l \cdot \cos(\alpha(t))\right)}{\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l \cdot \cos(\alpha(t))} \cdot \\ & \cdot \exp(-i \cdot f_d \cdot t) \cdot \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f}{c} \cdot z_2\right) df dt \end{aligned} \quad (10)$$

$$Rad = \Delta f \cdot \Delta t \cdot N \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \left[\frac{U_{n,n_1}}{T \cdot F} \cdot h(t_n, \gamma', \eta') \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi \cdot n_1 \cdot \Delta f}{c} \cdot l \cdot \cos(\alpha_n)\right)}{\frac{2\pi \cdot n_1 \cdot \Delta f}{c} \cdot l \cdot \cos(\alpha_n)} \cdot \exp(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot f_d \cdot \Delta_a \cdot n) \cdot \exp\left(-i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{f_{n_1}}{c} \cdot \Delta_r \cdot n_1\right) \right] \quad (11)$$

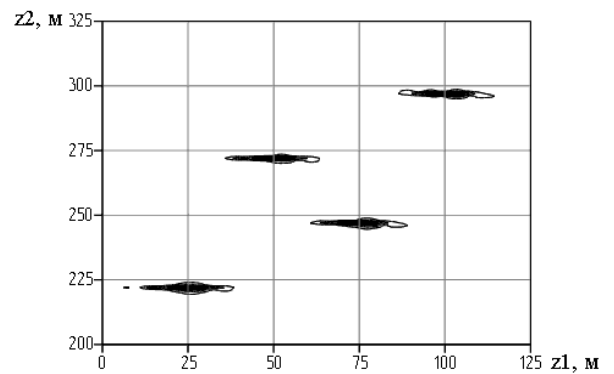
Суть классических алгоритмов автофокусировки не будет существенно изменяться. Однако, за счет более высокой контрастности, получающейся из-за предсказания характера рассеяния, общая энергия, сосредоточенная в блестящей точке повысится в число раз ΔE , определяемое как:

$$\Delta E = \frac{1}{\int_{\frac{T_n}{2}}^{\frac{T_n}{2} + \frac{f}{2}} \int_{\frac{f_0}{2}}^{\frac{f}{2}} \frac{B(t, f)}{T \cdot F} df dt} \quad (12)$$

Проведем исследование и сравнительный анализ эффективности предложенного метода. В качестве опорного будем использовать метод, основанный на классической процедуре и на классическом алгоритме. Оценки работоспособности предложенных методов будем проводить на основе геометрической модели, представленной на рис. 1. На рис. 2 представлены варианты изображения, полученные в соответствии с базовой методикой (рис.2а) и предложенной методикой повышения контрастности (рис. 2б и 2в).



а)



б)

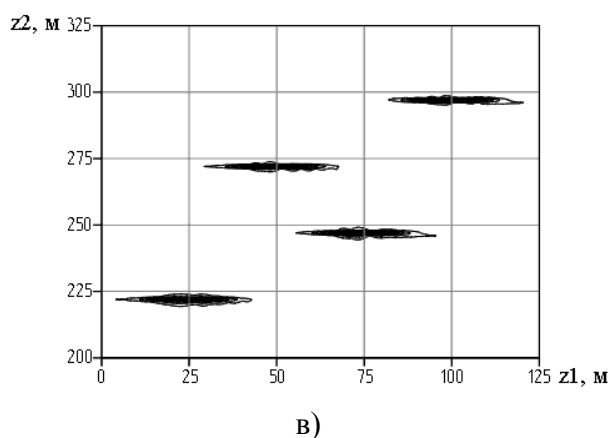
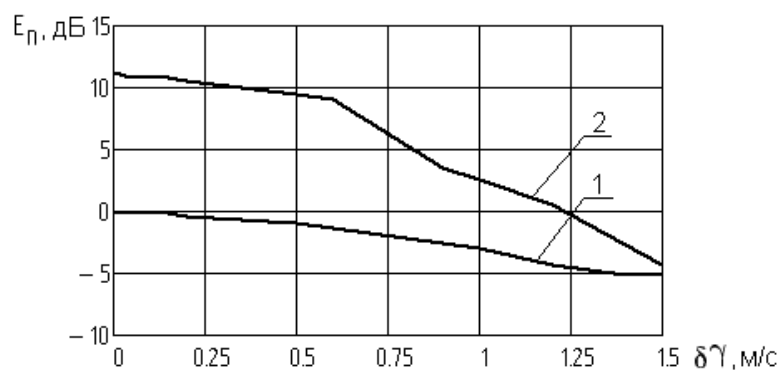


Рис. 2. Синтезированные изображения геометрического объекта, представленного на рис. 1, при применении: а) базового алгоритма построения изображений, б) модернизированного алгоритма построения изображений при точном оценивании геометрических размеров объекта и в) модернизированного алгоритма построения изображений при ошибке оценивания геометрического размера объекта l на 50 %

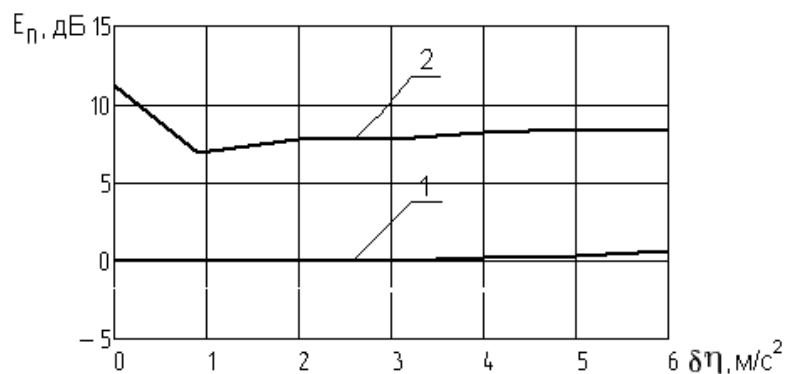
Как видно на приведенных рисунках, чисто визуальную контрастность изображения при применении предложенных методик повышается. На основе данного рисунка можно провести количественную оценку повышения контрастности изображения. Для этой цели проведем последовательный расчет изображений в зависимости от ошибки траекторных параметров, заложенных намеренно при получении изображений. Отобразим результаты моделирования в виде двух семейств зависимостей вида $E_n(\delta\gamma)$ и $E_n(\delta\eta)$, представленных на рис. 3а и 3б, где $\delta\gamma$ - среднеквадратическое отклонение оценки радиальной скорости, $\delta\eta$ - среднеквадратическое отклонение оценки радиального ускорения. Величина E_n представляет собой нормированную величину контраста блестящей точки изображения, рассчитанную как

$$E_n = \left(\frac{E_{\text{макс}}}{E_{b,l}} \right) / \left(\frac{E_{\text{макс}0}}{E_{b,l0}} \right), \quad (13)$$

где $E_{\text{макс}}$ - максимальная величина пика изображения, $E_{b,l}$ - уровень боковых лепестков в изображении, $E_{\text{макс}0}$ - максимально достижимая идеализированная величина изображения при отсутствии любых мешающих факторов для классического алгоритма построения радиоизображения, $E_{b,l0}$ - уровень боковых лепестков в изображении при отсутствии любых мешающих факторов для классического алгоритма построения радиоизображения.



а)



б)

Рис. 3. Зависимости потерь контрастности построенного радиоизображения, выраженные в виде снижения нормированной величины контраста блестящей точки изображения E_n от начальной расфокусировки изображения по: а) радиальной скорости и б) радиальному ускорению для 1) базового и 2) модифицированного алгоритма построения изображений

Как видно из представленных зависимостей, рассмотренные алгоритмы оказываются более эффективны, чем известные ранее, с точки зрения достижимого уровня контрастности по крайней мере на 10...12 дБ в условиях нормировки.

Список использованных источников:

1. Нефедов С.И., Крючков И.В., Коротеев Д.Е. Особенности проекта миллиметровой радиолокационной системы радиовидения космических аппаратов. // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2009. Спец. выпуск. С. 48 – 52.
2. Радиолокационная станция радиовидения космических аппаратов миллиметрового диапазона РЛС РВМГТУ / С.И. Нефедов [и др.] // Радиолокационное зондирование природных сред: Труды XXVII всероссийского симпозиума. Санкт-Петербург. 2011. – в печати.

3. Орлов В.М., Шустиков В.Ю., Юсова Ю.С. Разработка и анализ алгоритма построения радиоизображений целей для наземной когерентной радиолокационной станции // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. Спец. выпуск. 2009. С.116-123.

4. Орлов В.М., Шустиков В.Ю., Нефедов С.И. Моделирование инверсно синтезированных радиолокационных изображений движущихся объектов на основе факетных моделей // Антенны. 2005. Вып 10 (101). С. 69 – 75.

Method of increasing radioimage contrast on the basis of minimal-parametric modelling

77-30569/251783

11, November 2011

Nefedov S.I.

Bauman Moscow State Technical University

nefedov@bmstu.ru.

The author proposes a method of increasing radioimage contrast on the basis of minimal-parametric modelling. This method allows to increase overall performance of space vehicle imaging radar RLS RV (MG TU). Results of simulation and comparison of basic image building method with the proposed method are given.

Publications with keywords: [range profile](#), [isar image](#), [minimal-parametric modelling](#), [cross range profile](#), [contrast](#)

Publications with words: [range profile](#), [isar image](#), [minimal-parametric modelling](#), [cross range profile](#), [contrast](#)

Reference:

- 1.Nefedov S.I., Kriuchkov I.V., Koroteev D.E., Vestnik MGTU. Ser. Priborostroenie - Bulletin of BMSTU. Ser. Instrumentation Special issue (2009) 48-52.
- 2.S.I. Nefedo, et al., in: Proceedings of the XXVII All-Russia Symposium on Radar sensing of natural environments, Sankt-Peterburg, 2011. – v pechaty.
- 3.Orlov V.M., Shustikov V.Iu., Iusova Iu.S., Vestnik MGTU. Ser. Priborostroenie - Bulletin of BMSTU. Ser. Instrumentation Special issue (2009) 116-123.
- 4.Orlov V.M., Shustikov V.Iu., Nefedov S.I., Antenny 10 (101) 2005 69 – 75.