

Математическая модель радиолокатора с обращенной синтезированной апертурой. 2. Режим построения радиолокационного изображения цели

В. Н. Кочин

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: kochin@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 6 марта 2008 г., после переработки 5 июня 2009 г.

Настоящая статья представляет собой вторую часть работы, посвященной математическому моделированию радиолокатора с инверсной синтезированной апертурой. Показана возможность получения радиолокационных изображений объектов, движущихся по околоземным орбитам, с помощью метода контрастной оптимизации изображения, основанного на минимизации функции энтропии интенсивности изображения. Для иллюстрации использовалась модель объекта, состоящая из пяти отражающих точек. Полученные изображения удовлетворительного качества подтверждают выполнимость условий автофокусировки радиолокационных изображений для объектов, движущихся на расстояниях до 4000 км, при заданных основных параметрах приемопередающей системы.

Введение

Как было отмечено в [1], обнаружение цели, движущейся на большом расстоянии от точки наблюдения, зависит от отношения сигнал/шум (SNR) на входе приемника. Получение радиолокационного изображения цели с требуемым разрешением для радиолокаторов с инверсной синтезированной апертурой (ISAR) в идеальном случае не зависит от этого отношения. Ухудшение качества изображения в зависимости от расстояния в значительной степени определяется уменьшением SNR для отдельных разрешаемых элементов изображения (пикселей) [2]. Следовательно, дальность действия радара, на которой может быть получено изображение, определяется с использованием SNR на входе приемника для сигналов, отраженных от отдельных разрешаемых элементов (элементарных рассеивателей) цели. Уменьшение SNR для сигналов, отраженных от отдельных разрешаемых элементов, компенсируется

с помощью коэффициента обработки изображения, получаемого за счет когерентного интегрирования, присущего процедуре построения изображения [2]. Кроме того, в уравнение дальности ISAR входят сечения рассеяния отдельных разрешаемых элементов. В режиме обнаружения цели дальность зависит от радиолокационного сечения рассеяния, определяемого вкладом всех элементарных рассеивателей.

Время когерентного интегрирования

Для получения изображения цели с пространственным разрешением в поперечном направлении Δ_{cr} необходимо, согласно [2], чтобы за время когерентного интегрирования T_c цель повернулась вокруг своей оси на угол

$$\vartheta = \omega_r T_c \geq \frac{\lambda}{2\Delta_{cr}}, \quad (1)$$

где ω_r – постоянная угловая скорость вращения цели вокруг центра масс, λ – длина волны излучаемого сигнала. Время когерентного интегрирования зависит от способности антенной системы отслеживать движение цели. Как было показано в [1], электрический привод антенной системы радиотелескопа РТ-22 не позволяет отслеживать в автоматическом режиме цели, движущиеся на высотах от 300 до 4000 км. То есть время когерентного интегрирования в режиме построения изображения, как и в режиме обнаружения [1], ограничено временем прохождения целью области, освещаемой лучом радиолокатора. Следовательно, режим построения изображения возможен для объектов, параметры траектории движения которых известны. В [1] (формулы (10) и (11)) показано, как по известным параметрам орбиты движения цели и углу наблюдения можно вычислить время когерентного интегрирования. Поскольку оно ограничено, для достижения требуемого разрешения в поперечном направлении цель должна вращаться достаточно быстро. Минимальная угловая скорость вращения цели вокруг своей оси при заданных разрешении в поперечном направлении и времени когерентного интегрирования определяется с помощью формулы (1). Ниже будет показано, что в этом случае смещение отдельных рассеивателей через элементы разрешения, обусловленное вращением цели, будет незначительным. В дальнейшем при численном моделировании работы ISAR будем рассматривать именно этот режим работы.

Период повторения T_2 импульсов с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ-импульсов), который требуется для однозначной дискретизации данных об отражательной способности, при наблюдении цели протяженностью w_c в поперечном направлении в режиме построения изображения должен удовлетворять условию [2]

$$\frac{1}{T_2} \geq \frac{2\omega_r w_c}{\lambda}. \quad (2)$$

При этом предполагается, что комплексные отсчеты отраженного сигнала накоплены таким образом, что один отсчет находится в каждом элементе разрешения по дальности для каждого излученного импульса.

Компенсация поступательного движения

Практически задача компенсации поступательного движения (см. формулу (3) в [1]) для тактических целей (самолеты, корабли) может быть решена в два этапа. На первом этапе проводится юстировка элемента разрешения по дальности, что соответствует грубой компенсацией поступательного движения, на втором – корректирование фазы, что соответствует точной компенсации. Для различных требований точности компенсации в вышеупомянутых двух этапах было развито много алгоритмов [3, 4]. На первом этапе юстировка элемента разрешения по дальности может быть осуществлена путем привязки (фиксации) первого сильного пика каждого отраженного сигнала к выбранному элементу разрешения по дальности. Другие алгоритмы, например метод корреляции огибающей отраженного сигнала или метод разности фаз в спектральной области, могут использоваться для оценки сдвига элемента разрешения по дальности между двумя смежными откликами [3, 4]. Для второго этапа также разработано много методик. Среди них следует отметить метод слежения за доплеровским центроидом [5], метод автофокусировки с помощью фазового градиента (PGA) [6] и метод обработки по ярким точкам (PPP) [7].

Кроме вышеупомянутых методов, существует так называемый метод контрастной оптимизации изображения, с помощью которого можно фокусировать изображение, основываясь на его качестве. Его основная идея состоит в том, чтобы использовать специально выбранную функцию оценки изображения для измерения степени его фокусировки и искать оптимальные параметры компенсации поступательного движения, которые могут минимизировать эту функцию оценки. В качестве функции оценки изображения может быть выбрана или функция энтропии [2, 8], или функция контрастности [9].

В настоящей работе в качестве метода коррекции поступательного движения будет использоваться метод контрастной оптимизации на основе минимизации функции энтропии. Такой выбор обусловлен тем, что при работе

на больших расстояниях и при небольшой мощности передатчика обработка отдельных отраженных импульсов вероятнее всего не позволит, например, выделить сильный пик на отдельном профиле дальности (при обработке каждого отраженного импульса) и привязать его к выбранному элементу.

Для простоты будем считать, что цель движется по гладкой траектории, и движение цели может быть описано многочленом второго порядка

$$r_0(t) = r_{00} + v_r t + \frac{1}{2} a_r t^2.$$

В этом случае должны быть оценены два параметра, начальная скорость v_r и постоянное ускорение a_r , (расстояние до объекта в момент начала наблюдения r_{00} определяется в режиме обнаружения).

Компенсация поступательного движения по минимуму энтропии реализована в работе следующим образом. Принимаемый отраженный от i -го элементарного рассеивателя сигнал [1]

$$s_r(n, t) = \tilde{\sigma}_i s_{ir} \left(n, t - \frac{2r_i(t)}{c} \right)$$

умножается на опорный сигнал в виде

$$s_{ref}(n, t) = \exp \left\{ -j2\pi \left[f_c t + \frac{\gamma}{2} (t - nT_2)^2 \right] \right\},$$

где $r_i(t)$ – расстояние от точки наблюдения до i -го элементарного рассеивателя, c – скорость света, f_c – несущая частота, γ – коэффициент частотной модуляции излучаемого сигнала. После детектирования получаем видеосигнал

$$s_i(n, t) = \tilde{\sigma}_i \exp \left\{ -j2\pi \left[\frac{f_c}{c} + \frac{\gamma}{c} (t - nT_2) - \frac{\gamma}{2c} \frac{2r_i(t)}{c} \right] 2r_i(t) \right\},$$

где коэффициент усиления антенны, амплитудная функция излучаемого сигнала и изменение амплитуды сигнала при распространении туда и обратно включены в $\tilde{\sigma}_i$. Полный видеосигнал, отраженный от цели, будет иметь вид

$$S(n, t) = \sum_i \tilde{\sigma}_i \times \exp \left\{ -j2\pi \left[\frac{f_c}{c} + \frac{\gamma}{c} (t - nT_2) - \frac{\gamma}{2c} \frac{2r_i(t)}{c} \right] 2r_i(t) \right\}, \quad (3)$$

где суммирование ведется по всем отражающим точкам. Видеосигнал (3) дискретизируется по времени с шагом дискретизации, равным эффективной длительности импульса, необходимой для достижения требуемой разрешающей способности в продольном направлении Δ_s , т. е. $\Delta t = \frac{2\Delta_s}{c} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-8}$ с. В результате дискретизации N_p принятых импульсов получим набор из $N_p \times N_s$ отсчетов вида

$$G_{m,n} = \sum_i \tilde{\sigma}_i \exp \left\{ -j4\pi \left[\frac{f_c}{c} + \frac{\gamma}{c} (t_n^0 + m\Delta t - nT_2) - \frac{\gamma}{2c} \frac{2r_i(t_n^0 + m\Delta t)}{c} \right] r_i(t_n^0 + m\Delta t) \right\}, \quad (4)$$

$$m = 1, 2, \dots, N_s, \quad n = 1, 2, \dots, N_p,$$

где t_n^0 – начало записи n -го видеоимпульса; $N_s = T_1/\tau$ – число точек дискретизации каждого видеоимпульса, T_1 – длительность импульса. Компенсация поступательного движения заключается в умножении выражения (4) на экспоненту

$$\exp \left\{ j4\pi \left[\frac{f_c}{c} + \frac{\gamma}{c} (t_n^0 + m\Delta t - nT_2) - \frac{\gamma}{2c} \frac{2\tilde{r}_0(t_n^0 + m\Delta t)}{c} \right] \tilde{r}_0(t_n^0 + m\Delta t) \right\},$$

где $\tilde{r}_0(t) = r_{00} + \tilde{v}_r t + \tilde{a}_r t^2 / 2$, r_{00} – положение центра вращения объекта в начальный момент времени, \tilde{v}_r и \tilde{a}_r – начальные приближения значений скорости и ускорения поступательного движения центра масс объекта. В результате получим матрицу из $N_p \times N_s$ элементов вида

$$G'_{m,n} = \sum_i \tilde{\sigma}_i \exp \left\{ -j4\pi \left[\frac{f_c}{c} + \frac{\gamma}{c} (t_n^0 + m\Delta t - nT_2) - \frac{\gamma}{c} \frac{2\tilde{r}_0(t_n^0 + m\Delta t)}{c} \right] \left[r_i(t_n^0 + m\Delta t) - \tilde{r}_0(t_n^0 + m\Delta t) \right] \right\}, \quad (5)$$

$$m = 1, 2, \dots, N_s, \quad n = 1, 2, \dots, N_p,$$

где выражение $r_i(t_n^0 + m\Delta t) - \tilde{r}_0(t_n^0 + m\Delta t)$ описывает положение i -й отражающей точки в системе координат, связанной с целью. При получении выражения (5) предполагалось, что размеры цели значительно меньше расстояния до них, т. е.

$$r_i(t_n^0 + m\Delta t) + \tilde{r}_0(t_n^0 + m\Delta t) \approx 2\tilde{r}_0(t_n^0 + m\Delta t).$$

Путем обратного двумерного дискретного преобразования Фурье матрицы $\|G'_{mn}\|$ получим радиолокационное изображение цели, которое определяется коэффициентами отражения цели, отображенными на плоскость дальность – частота Допплера. Оно является функцией скорости и ускорения центра вращения цели,

$$I_{mn}(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r) = \text{IDFT}_{mn}(\|G'_{mn}\|), \quad m = 1, 2, \dots, N_s, \quad n = 1, 2, \dots, N_p,$$

где IDFT_{mn} означает обратное двумерное дискретное преобразование Фурье.

Определим интенсивность нормированного изображения как

$$\bar{I}_{m,n}(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r) = \frac{|I_{m,n}(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r)|^2}{\sum_{n=0}^{N_p-1} \sum_{m=0}^{N_s-1} |I_{m,n}(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r)|^2},$$

где $\bar{I}_{m,n}(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r)$ – величина нормированной интенсивности пикселя изображения в дискретных положениях пространства изображения (m, n) .

Энтропия нормированной интенсивности радиолокационного изображения для первых оценок скорости и ускорения $(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r)$ определяется как

$$H_e(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r) = - \sum_{n=0}^{N_p-1} \sum_{m=0}^{N_s-1} \bar{I}_{m,n}(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r) \ln[\bar{I}_{m,n}(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r)].$$

Процедура вычисления величины $H_e(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r)$ повторяется с различными наборами значений скорости и ускорения $(\tilde{v}_r, \tilde{a}_r)$ до тех пор, пока ищутся параметры поступательного движения (3), которые дадут минимальную энтропию.

Численное моделирование

Для построения радиолокационного изображения движущегося объекта мы предполагали, для простоты, что скорость вращения цели постоянна и изменение угла ракурса (положения) очень мало. Поэтому компенсация вращательного движения и полярное переформатирование массива данных $G_{m,n}$ в работе не рассматривается. Параметры приемно-передающей системы в режиме построения изображения считались такими же, как и в режиме обнаружения (см. таблицу в [1]). Длительность импульса также выбиралась равной $T_1 = 10^{-5}$ с [1]. При такой длительности импульса и требуемом разрешении по дальности число точек дискретизации каждого отраженного сигнала принималось равным $N_s = 4096$ для высоты орбиты цели до 2000 км и $N_p = 8192$ для высоты орбиты, равной 4000 км (с учетом изменения дальности до объекта за время когерентного интегрирования). Период следования импульсов вычислялся по формуле $T_2 \approx T_c / N_p$ с учетом условия (2) и ограниченной мешающего действия передачи при выборе частоты следования импульсов (12) в [1].

В качестве объекта, радиолокационное изображение которого необходимо построить, рассмотрим набор из пяти отражающих точек (рис. 1) с коэффициентами отражения,

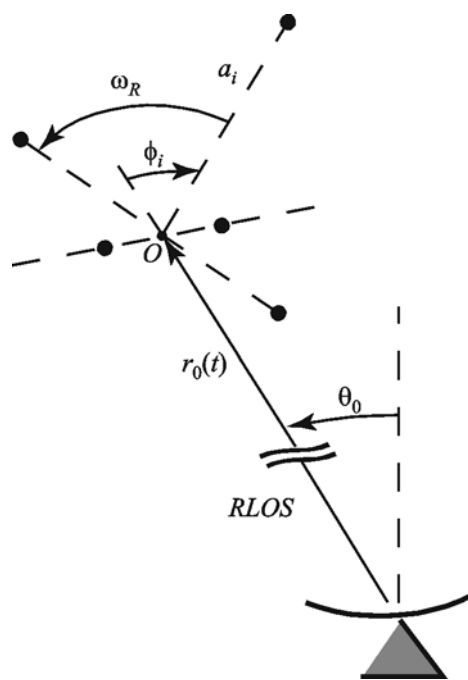


Рис. 1. Геометрия задачи для численного анализа. RLOS – линия прямой видимости радара

равными $\sigma_i = 1.0$, $i = 1, 2, \dots, 5$, имеющих следующие полярные координаты в системе координат, связанной с центром вращения цели: $(a_1, \phi_1) = (0.25, 0.0)$, $(a_2, \phi_2) = (9.0, \pi/4)$, $(a_3, \phi_3) = (2.0, 3\pi/4)$, $(a_4, \phi_4) = (0.25, \pi)$, $(a_5, \phi_5) = (2.0, 7\pi/4)$. Угловая скорость вращения цели вокруг центра масс ω_r выбиралась равной минимальной скорости вращения, необходимой для получения заданного разрешения в поперечном направлении при заданных высоте орбиты и времени когерентного интегрирования. При формировании отраженных от цели сигналов с ними для моделирования влияния шума суммировались случайные комплексные числа, реальная и мнимая части которых распределены по нормальному закону со средним значением, равным нулю, и средним квадратичным отклонением, равным $1/\sqrt{2(S/N)_1}$. В этом случае значения этих чисел такие, что SNR равно $(S/N)_1$ (формула (9) в [1]) при заданном радиолокационном сечении рассеяния цели. Узкополосное радиолокационное сечение рассеяния рассматриваемой цели вычисляется по формуле [2]

$$\bar{\sigma} = \left| \sum_{i=1}^5 \sqrt{\sigma_i} \exp\left(j \frac{4\pi a_i}{\lambda}\right) \right|^2.$$

Для выбранных параметров цели ее радиолокационное сечение рассеяния равно $\bar{\sigma} = 1.61 \text{ м}^2$.

В качестве первого примера рассмотрим цель, состоящую из указанных выше точек (рис. 1), которая движется по околоземной орбите на высоте 300 км над уровнем Земли. Угол между направлением на объект и направлением в зенит в начальный момент времени равен $\theta_0 = 45^\circ$. При таком расстоянии между антенной радара и целью время когерентного интегрирования примерно равно $T_c \approx 0.076 \text{ с}$. В течение этого времени цель будет находиться в пределах ширины диаграммы направленности антенной системы по половинной мощности. Угловая скорость вращения объекта выбиралась равной $\omega_r = 0.28825 \text{ рад/с}$ (формула (1) при $\lambda = 2.18 \text{ см}$ и $\Delta_{cr} = 0.5 \text{ м}$). В этом случае смещение, которое обусловлено вращением цели, для элементарного рассеивателя, находящегося на максимальном расстоянии от центра масс цели, не будет превышать 0.2 м. SNR на входе приемной системы для одного импульса при $\bar{\sigma} = 1.61 \text{ м}^2$ равно $(S/N)_1 = 10.64 \text{ дБ}$ (для свободного пространства).

Рис. 2 – 4 иллюстрируют основные этапы работы предлагаемого в статье алгоритма. На рис. 2 приведено изображение объекта без компенсации поступательного движения при накоплении 64 импульсов при частоте повторения импульсов 846 Гц. На рис. 3 изображена

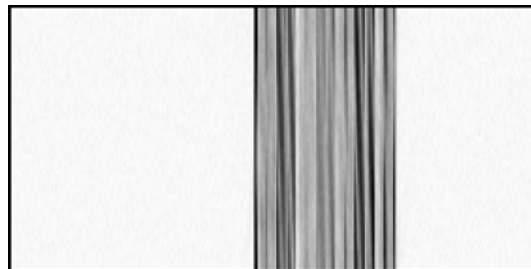


Рис. 2. Несфокусированное радиолокационное изображение цели. Высота орбиты – 300 км

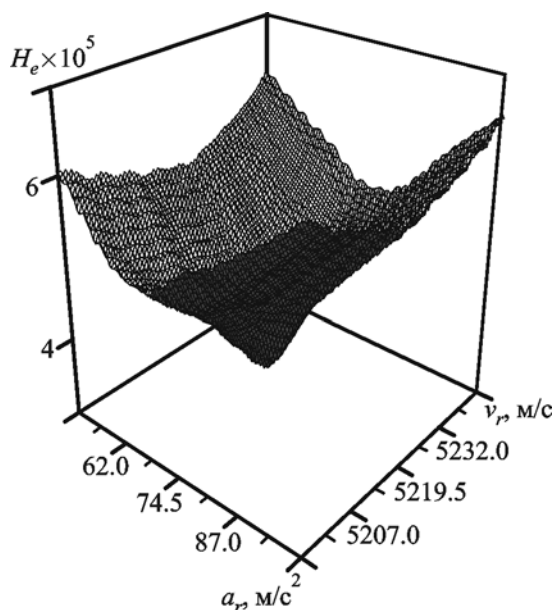


Рис. 3. Поверхность энтропии интенсивности изображения цели как функция радиальных скорости и ускорения центра вращения. Высота орбиты – 300 км

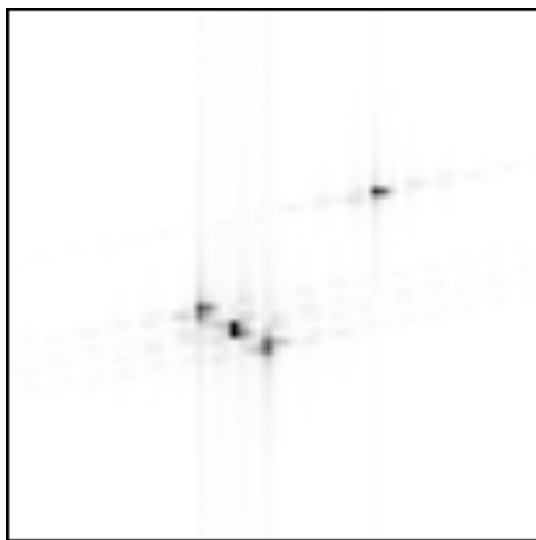


Рис. 4. Сфокусированное радиолокационное изображение цели. Высота орбиты – 300 км

поверхность энтропии интенсивности изображения как функция скорости v_r и ускорения a_r центра вращения объекта. На рис. 4 приведено радиолокационное изображение объекта

после компенсации поступательного движения. При компенсации поступательного движения значения скорости v_r и ускорения a_r центра вращения выбирались равными 5219.5237 м/с и 71.3866 м/с². Они соответствуют значениям скорости и ускорения в точке минимальной энтропии (рис. 3).

Рис. 5 – 7 иллюстрируют работу алгоритма для следующих параметров движения цели: высота орбиты над уровнем моря – 3990 км, угол между направлением на объект и направлением в зенит в начальный момент времени – 5°. SNR на входе приемной системы для одного импульса при $\bar{\sigma} = 1.61$ м² равно $(S/N)_1 = -28.7$ дБ (для свободного пространства).

При выбранном расстоянии между антенной радара и целью время когерентного интегрирования, в течение которого цель будет находиться в пределах ширины диаграммы направленности антенны по половинной мощности, примерно равно $T_c \approx 0.67$ с. Угловая скорость вращения объекта выбиралась равной $\omega_r = 0.03254$ рад/с. В этом случае смещение отдельных рассеивателей, обусловленное вращением цели, также не будет превышать 0.2 м. При заданном времени когерентного интегрирования и накоплении 4096 импульсов частота следования импульсов выбиралась равной 6112 Гц. При компенсации поступательного движения значения скорости v_r и ускорения a_r центра вращения выбирались равными 332.5 м/с и 6.0 м/с², что соответствует значениям скорости и ускорения в точке минимальной энтропии (рис. 6).

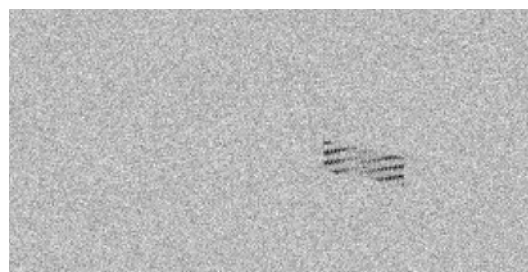


Рис. 5. Несфокусированное радиолокационное изображение цели. Высота орбиты – 3990 км

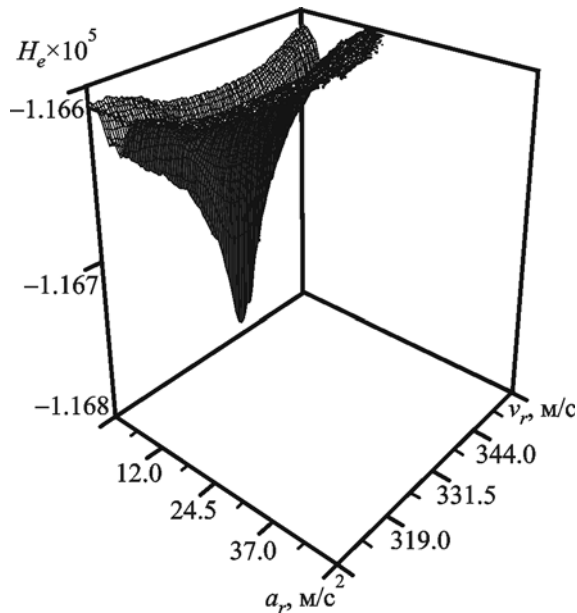


Рис. 6. Поверхность энтропии интенсивности изображения цели как функция радиальных скорости и ускорения центра вращения. Высота орбиты – 3990 км

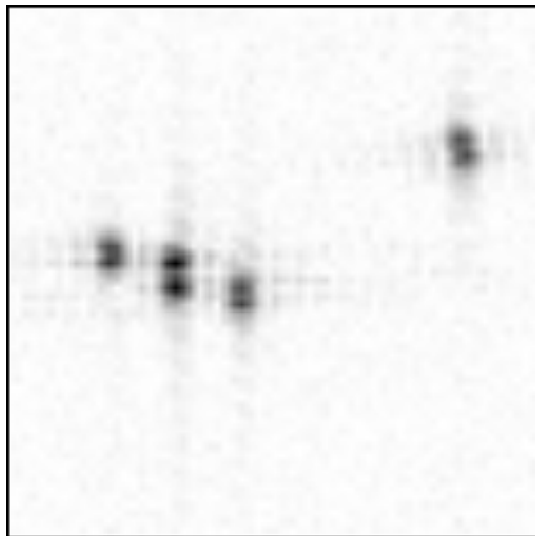


Рис. 7. Сфокусированное радиолокационное изображение цели. Высота орбиты – 3990 км

Необходимо отметить, что определение радиальной скорости и радиального ускорения цели с помощью метода минимизации энтропии контрастности изображения требует

знания области, в которой могут располагаться искомые значения скорости и ускорения. Поэтому перед поиском минимума энтропии необходимо провести приближенную оценку ожидаемых значений радиальных скорости и ускорения, например по дальности и углу наблюдения, с учетом движения по орбите.

Получение радиолокационных изображений объектов, движущихся на более высоких орбитах, возможно либо при использовании более мощного передатчика, либо при накоплении большего числа импульсов.

Выводы

В работе проанализирована упрощенная (не рассмотрены вопросы ухудшения качества изображения, обусловленного вращением цели) модель ISAR при использовании антенной системы радиотелескопа РТ-22. Показана возможность получения радиолокационных изображений объектов, движущихся по околоземным орбитам, с помощью метода контрастной оптимизации изображения, основанного на минимизации функции энтропии интенсивности изображения. Показано, что при импульсной мощности передатчика в 100 Вт и использовании техники сжатия импульсов за время когерентного интегрирования, равное времени нахождения цели в пределах ширины диаграммы направленности по половинной мощности, возможно построение изображения объектов с рассмотренным в работе значением радиолокационного сечения рассеяния (и выше), движущихся на расстояниях до 4000 км от точки наблюдения.

Литература

1. Кочин В. Н. Математическая модель радиолокатора с обращенной синтезированной апертурой. 1. Постановка задачи. Режим обнаружения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, №4. – С. 403-412.
2. Wehner D. R. High-Resolution Radar. Second Edition. – Boston–London: Artech House, 1995. – 553 p.
3. Chen C.-C., Andrews H. C. Target-Motion-Induced Radar Imaging // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1980. – Vol. 16, No. 1. – P. 2-14.
4. Delisle G. Y., Wu H. Moving target imaging and trajectory computation using ISAR // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1994. – Vol. 30, No. 3. – P. 887-899.

5. Itoh T., Sueda H., Watanabe Y. Motion compensation for ISAR via centroid tracking // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1996. – Vol. 32, No. 3. – P. 1191-1197.
6. Wahl D. E., Eichel P. H., Ghiglia D. C., Jakowatz C. V. Jr. Phase gradient autofocus – A robust tool for high resolution SAR phase correction // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1994. – Vol. 30, No. 3. – P. 827-835.
7. Werness S., Carrara W., Joyce L., Franczak D. Moving Target Imaging Algorithm for SAR Data // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1990. – Vol. 26, No. 1. – P. 57-67.
8. Xi L., Guosuoi L., Ni J. Autofocusing of ISAR Images Based on Entropy Minimization // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1999. – Vol. 35, No. 4. – P. 1240-1251.
9. Berizzi F., Cosini G. Autofocusing of Inverse Synthetic Aperture Radar Images Using Contrast Optimization // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1996. – Vol. 32, No. 3. – P. 1185-1191.

**Математична модель радіолокатора
з оберненою синтезованою апертурою.
2. Режим побудови радіолокаційного
зображення цілі**

В. М. Кочін

Ця стаття є другою частиною роботи стосовно математичного моделювання радіолокатора з інверсною синтезованою апертурою. Показана можливість отримання радіолокаційних зображень об'єктів, що рухаються навколоземними орбітами, за допомогою методу

контрастної оптимізації зображення, що базується на мінімізації функції ентропії інтенсивності зображення. Для ілюстрації використовувалася модель об'єкту, що складалася з п'яти відбиваючих точок. Отримані зображення задовільної якості підтверджують здійснимість умов автофокусування радіолокаційних зображень для об'єктів, що рухаються на відстанях до 4000 км, за заданих основних параметрах приймально-передавальної системи.

**Mathematical Model
of Inverse Synthetic Aperture Radar.
2. Radar Target Imaging Mode**

V. N. Kochin

This paper is the second part of the work dealing with mathematical modeling of the inverse synthetic aperture radar. The possibility of obtaining radar images of targets moving by circumterrestrial orbits is shown with the help of image contrast optimization based on minimization of entropy function of image intensity. For illustration we use the object model consisting of five reflecting points. Satisfactory quality images confirm the ability of auto-focusing conditions of radar images for targets moving at distances up to 4,000 km for the given main parameters of a receiving-transmitting system.