

УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ АППРОКСИМАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЦЕЛИ

А. В. Сафонова, к.т.н., доцент кафедры РТС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0396-2953, e-mail: safonova.a.v@rsreu.ru

В. И. Мартынов, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4960-4043, e-mail: vasy97@bk.ru

Рассмотрена задача построения радиолокационного изображения сложной цели с использованием сверхширокополосных сигналов. Перечислены наиболее известные алгоритмы, выполняющие данную задачу. Целью работы является разработка нового эффективного алгоритма обработки радиосигналов. Предложен алгоритм адаптивной аппроксимации для получения радиолокационного изображения цели. Проведено сравнение разработанного алгоритма с ранее известными решениями по двум критериям эффективности – минимуму средней величины ошибки яркости и минимуму относительного изменения среднего контраста. Доказаны преимущества предложенного алгоритма при обработке радиолокационного изображения при наличии шумов.

Ключевые слова: сверхширокополосный сигнал, радиолокационное изображение, доплеровский алгоритм, алгоритм обратной проекции в частотной области, алгоритм максимальной корреляции, алгоритм адаптивной аппроксимации.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-23-33

Введение

Одной из наиболее многообещающих возможностей использования сверхширокополосных (СШП) сигналов в радиолокации является построение радиолокационных изображений объектов с их последующим распознаванием и идентификацией, например воздушных целей, людей за радиопрозрачными препятствиями и других отражающих объектов [1-3].

Данная возможность появляется за счет сверхвысокой разрешающей способности СШП сигналов, обусловленной малой пространственной протяженностью сигнала по сравнению с размерами цели [4]. В таком случае цель становится сложной и может быть представлена в виде совокупности отражающих точек от каждого элемента разрешения (элементарных отражателей), а сигнал на входе приемника представляет собой суммарный сигнал от каждого отражателя. Задачей алгоритма обработки является восстановление пространственного расположения элементарных отражателей по реализации принятого сигнала, то есть построение радиолокационного изображения. В настоящее время предложен ряд алгоритмов, выполняющих данную задачу [5, 6].

Задачей проводимого исследования является выделение наилучшего алгоритма обработки по совокупности параметров.

Теоретические исследования

Исходные данные

В работе используется непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией с периодом 77,7 мс, частота сигнала меняется в пределах от 11,85 до 18,05 Гц. В [7] сообщается о создании передающей и приемных частей радиолокатора, работающего с данным сигналом. Однозначная дальность при этом равна 180 см, а разрешение по дальности равно 2,42 см.

Высокое разрешение по угловой координате достигается за счет применения инверсного синтезирования апертуры антенны на основе собственного вращения цели с постоянной угловой скоростью $\omega = 0,02$ рад/с. Правильный выбор интервала синтезирования обеспечивает

линейное угловое разрешение по азимуту, равное разрешению по дальности, если учитываются траекторные особенности сигнала за время синтезирования [8, 9].

Применение линейной частотной модуляции по пилообразному закону удобно с точки зрения уменьшения частоты дискретизации, поскольку сигнал оцифровывается на частоте биений.

Измеряемыми координатами элементарных отражателей являются азимут и дальность. Высокое разрешение по дальности и угловой координате позволяет получить плоское изображение отражающих точек цели. Исходные и полученные изображения отражающих точек цели будут представлены в координатах курсовая дальность (дальность) и параметр цели (линейная координата цели вдоль азимута) параметрической системы координат.

Модель сигнала на частоте биений имеет следующий вид

$$s(t, t_m) = \sum_{l=1}^L \sigma_l * \exp(j(4\pi r_l / \lambda) + j2\pi kt(2r_l / c)),$$

где σ_l – интенсивность отраженного сигнала l -й отражающей точки, r_l – дальность до l -й отражающей точки, L – количество отражающих точек, k – скорость изменения частоты, t – время, t_m – время запаздывания, c – скорость света в вакууме, λ – средняя длина волны. Дальность до l -й отражающей точки может быть выражена следующим образом

$$r_l = \sqrt{(r_0^2 + r_{pl}^2 + 2r_0 r_{pl} \sin(\alpha_{pl} + \omega t_m))}, \quad (1)$$

где r_0 – расстояние до точки вращения цели с известными координатами, r_{pl} – расстояние от l -й отражающей точки до точки вращения, α_{pl} – азимут l -й отражающей точки относительно центральной точки, ω – угловая скорость вращения цели. С помощью тригонометрических формул выражение $r_{pl} \sin(\alpha_{pl} + \omega t_m)$ может быть преобразовано к виду

$$r_{pl} \sin(\alpha_{pl} + \omega t_m) = x_{pl} \sin(\omega t_m) + y_{pl} \cos(\omega t_m), \quad (2)$$

где x_{pl} и y_{pl} – декартовы координаты относительно начала отсчета с центром в точке $(0; r_0)$ относительно антенны РЛС. Поэтому каждый сигнал, отраженный от l -й отражающей точки, однозначно определяется ее координатами x_{pl} и y_{pl} и интенсивностью σ_l , имеющей смысл амплитуды. Для упрощения сравнения алгоритмов амплитуды отраженных сигналов не учитываются. Тогда исходными данными для проведения моделирования можно считать координаты отражающих точек x_{pl} и y_{pl} и их количество l , в соответствии с которыми будет сформировано эталонное изображение отражающих точек цели.

Алгоритмы получения радиолокационного изображения цели

Одним из наиболее популярных алгоритмов обработки сигналов для получения радиолокационного изображения цели является доплеровский [7]. Применение двумерного алгоритма преобразования Фурье позволяет получить матрицу частот отражающих точек цели. Для получения изображения отражающих точек цели в выбранной системе координат необходимо лишь правильно масштабировать полученную матрицу частот и выделить нужный фрагмент из полного изображения. Реализовать алгоритм можно путем последовательного применения БПФ к строкам и столбцам матрицы принятого сигнала. К достоинствам алгоритма можно отнести простоту его реализации.

Алгоритм обратной проекции в частотной области (ОПЧО) основан на взвешивании результата доплеровского алгоритма весовыми функциями. Как сообщается в [10], наилучшими весовыми функциями являются обратные матрицы двумерного спектра каждого элементарного отражателя, от которого был получен отраженный сигнал. При этом закон изменения частоты для каждого элементарного отражателя известен и учитывается в процессе обработки, что позволяет рассчитать комплексную весовую функцию, однако неизвестно, какие именно элементарные отражатели послужили источником принятого сигнала, поэтому

необходимо учитывать их все в интересующем фрагменте зоны обзора. Весовые функции формируются следующим образом:

$$\mathbf{R}(x_{pl}, y_{pl}) = \text{vec}\{F(s(x_{pl}, y_{pl}))\}^{-1},$$

где $s(x_{pl}, y_{pl})$ – сигнал, образованный элементарным отражателем с координатами x_{pl} и y_{pl} , $F(\cdot)$ – оператор двумерного БПФ, $\text{vec}(\cdot)$ – оператор векторизации. Тогда матрица изображения отражающих точек цели может быть получена поэлементно

$$\hat{\sigma}_{x_l, y_l} = \text{vec}\{\mathbf{G}(s(t, t_m))\}^T * \mathbf{R}(x_{pl}, y_{pl}),$$

где $\mathbf{G}(s(t, t_m))$ – двумерный спектр принятого сигнала. Идея заключается в том, что если в принятом суммарном сигнале присутствует сигнал с координатами x_{pl} и y_{pl} , то результат весовой обработки будет близок к единице, в противном случае результат будет близок к нулю.

Преыдушие алгоритмы основывались на прямом получении изображения с помощью преобразования Фурье. Алгоритм максимальной корреляции (МК) [7] принципиально отличается тем, что основан на аппроксимации принятого сигнала набором комплексных экспонент, которые имитируют сигналы, отраженные от элементарных отражателей с известными координатами и законом их изменения. Таким образом, осуществляется декомпозиция принятого сигнала на составляющие и восстановление изображения отражающих точек цели. Очевидно, что ошибка восстановления изображения будет зависеть от точности аппроксимации.

В основе аппроксимации заложено предположение о существовании разложения матрицы принятого сигнала:

$$\text{vec}\{s(t, t_m)\} = \mathbf{\Phi} * \text{vec}\{\sigma_{x,y}\}, \quad (3)$$

где $\mathbf{\Phi}$ – словарная матрица, столбцы которой образованы векторами отраженного сигнала от каждой точки изображения заданного размера $\text{vec}\{s(x_{pl}, y_{pl})\}$. Фактически, словарная матрица содержит отраженный сигнал для каждого дискретного момента времени и каждого пространственного положения отражающих точек. Задачей алгоритма является правильное нахождение индексов тех столбцов матрицы $\mathbf{\Phi}$, которые реально образуют композицию принятого сигнала, и формирование из них матрицы $\mathbf{\Phi}_s$. Тогда вектор интенсивностей находится с помощью псевдообращения матрицы $\mathbf{\Phi}_s$:

$$\text{vec}\{\{\hat{\sigma}_{x,y}\}\} = \mathbf{\Phi}_s^+ * \text{vec}\{s(t, t_m)\}.$$

Далее в соответствии с исходными индексами столбцов матрицы $\mathbf{\Phi}_s$ формируется изображение отражающих точек цели путем присваивания элементам с координатами (x_{pl}, y_{pl}) значения $\hat{\sigma}_{x_l, y_l}$, остальные точки имеют нулевую амплитуду.

Выбор правильных составляющих словарной матрицы (поиск индексов) осуществляется нахождением матрицы корреляционных максимумов, каждый элемент которой образуется следующим образом

$$\text{Re}(K_l) = \text{Re}\{\text{vec}(s(x_{pl}, y_{pl}))\}^T * \text{Re}\{\text{vec}(s(t, t_m))\},$$

$$\text{Im}(K_l) = \text{Im}\{\text{vec}(s(x_{pl}, y_{pl}))\}^T * \text{Im}\{\text{vec}(s(t, t_m))\},$$

$$K_l = \sqrt{\text{Re}(K_l)^2 + \text{Im}(K_l)^2}.$$

Предполагается, что если в принятом сигнале содержится сигнал $s(x_{pl}, y_{pl})$, то взаимная корреляция сигналов будет велика, а если не содержится – мала. Входным параметром алгоритма МК является параметр T , определяющий уровень по отношению к максимальной корреляции $\max(K)$. Если очередной элемент $K_l \geq \frac{\max(K)}{T}$, то индекс l используется для формирования матрицы $\mathbf{\Phi}_s$. Таким образом осуществляются аппроксимация входного сигнала

L -м количеством составляющих его элементарных сигналов и нахождение L отражающих точек цели. Структурная схема алгоритма МК представлена на рисунке 1.

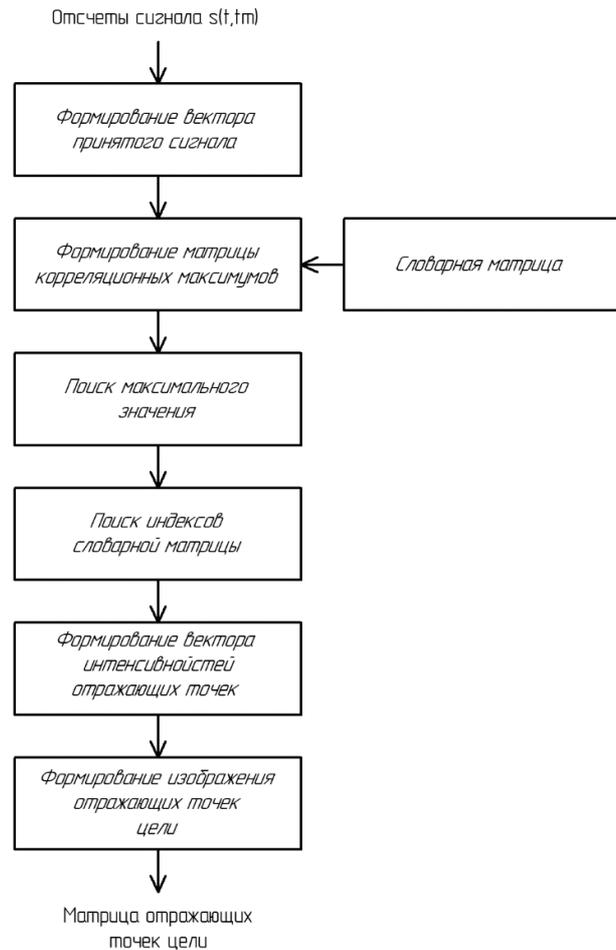


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма МК
Figure 1 – Block diagram of maximum correlation algorithm

Алгоритм адаптивной аппроксимации

Алгоритм МК получил развитие в алгоритме адаптивной разреженной аппроксимации [7], где входной параметр определяется путем разделения обрабатываемого радиолокационного изображения (РЛИ) на блоки, которые могут включать сразу несколько отражающих точек. Предлагаемый алгоритм адаптивной аппроксимации (АА) также является логическим продолжением алгоритма МК, но отличается тем, что в качестве исходных данных используется предположение о количестве отражающих точек L , а также используется отличная от предложенной ранее процедура получения нормы вектора ошибки аппроксимации принятого сигнала δ . Выражение (3) можно представить в виде

$$\text{vec}\{s(t, t_m)\} = \Phi * \text{vec}\{\sigma_{x,y}\} + \text{vec}\{n\},$$

где $\text{vec}\{n\}$ – комплексный вектор ошибки аппроксимации, которая может быть обусловлена действием шумов. Норма вектора ошибки ξ рассчитывается как

$$\xi = \sqrt{\text{vec}\{n\}^T * \text{vec}\{n\}^*}, \quad (4)$$

а условием завершения аппроксимации (условием выхода) является ее непревышение значения заданного параметра:

$$\xi \leq \delta. \quad (5)$$

Таким образом, возникает задача минимизации нормы ошибки аппроксимации не ниже заданного уровня и алгоритм становится итеративным. Вектор принятого сигнала при этом понимается как вектор начальной ошибки, поэтому значение параметра δ может быть зада-

но как некоторая часть нормы вектора начальной ошибки. Далее принцип работы алгоритма АА совпадает с алгоритмом МК с тем отличием, что процедура поиска индексов должна определить индексы L максимумов корреляции. Так как на предыдущей итерации кроме первой также были найдены индексы словарной матрицы, необходимо объединить их с текущими (объединение индексов). По объединенному списку проводится финальный тест путем формирования вектора интенсивностей отражающих точек цели и выбора из них индексов L максимальных значений, которые формируют матрицу Φ_F . Далее вычисляется вектор ошибки на текущей итерации

$$vec(n) = vec - \Phi_F * \Phi_F^+ * vec\{s(t, t_m)\}$$

с последующим вычислением ее нормы по формуле (4).

Если условие (5) выполняется, то цикл завершается получением изображения. Если условие не выполняется, но ошибка на текущей итерации уменьшилась, то вектор ошибки и список индексов на текущей итерации используются на следующей итерации с целью уточнения полученных результаты (обновление исходных данных). В противном случае полагается, что количества точек недостаточно и параметр L увеличивается по выбранному закону (увеличение параметра L). Структурная схема алгоритма АА представлена на рисунке 2.

Критерии оценки эффективности работы алгоритмов

На получившемся после обработки изображении отражающих точек цели амплитуды могут быть отличны от единицы, также могут появляться ложные точки слабой амплитуды. Кроме этого, возможна полная потеря некоторых отражающих точек исходного изображения или их смещение в точки с другими координатами. Чтобы учесть всю совокупность возникающих ошибок, было введено два критерия оценки эффективности работы алгоритмов.

Первый из них – минимум значения средней величины ошибки яркости (СВОЯ). Изображение отражающих точек цели представляет собой матрицу интенсивностей отраженного сигнала $\sigma_{xl,yl}$, которые при выводе изображения на экран интерпретируются как яркости соответствующих точек. Усреднение ошибки яркости полученного изображения по количеству точек изображения позволяет получить СВОЯ изображения в соответствии с формулой

$$СВОЯ = \sum_{l=1}^L \frac{|\hat{\sigma}_{xl,yl} - \sigma_{xl,yl}|}{L},$$

где $\hat{\sigma}_{xl,yl}$ – оценка интенсивности отраженного сигнала. Если интерпретировать исходную яркость точки как математическое ожидание оценки, то СВОЯ представляет собой среднее линейное отклонение оценки относительно эталонного изображения [11]. Поскольку максимальное значение яркости точки равно 1, теоретический предел СВОЯ также равен 1, это возможно в том случае, если все значения матрицы яркостей изображения являются инверсией значений исходной матрицы.

СВОЯ накапливается с появлением каждого очередного отклонения яркости точки полученного изображения от точки эталонного, поэтому позволяет оценить среднюю точность получения изображения в целом, однако не учитывает особенности зрительного восприятия изображения, такие как размытость и четкость полученных отражающих точек. Вторым критерием является минимум величины относительного изменения среднего контраста (ОИСК). Для этого введем средний контраст (СК):

$$СК(\sigma_{x,y}) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 |\sigma_{xl,yl} - \sigma_{xl+i,yl+j}|}{8}.$$

Две внутренние суммы выражают среднюю разность яркости отражающей точки и восьми близлежащих точек. Если данная точка цели не граничит с другими точками, то значение

контраста равно 1, если граничит – то меньше 1. Аналогичная операция выполняется для точек полученного изображения, яркость которых должна быть равна 1.

ОИСК может быть рассчитано по формуле

$$\text{ОИСК} = \frac{\text{СК}(\sigma_{x,y}) - \text{СК}(\hat{\sigma}_{x,y})}{\text{СК}(\sigma_{x,y})}.$$

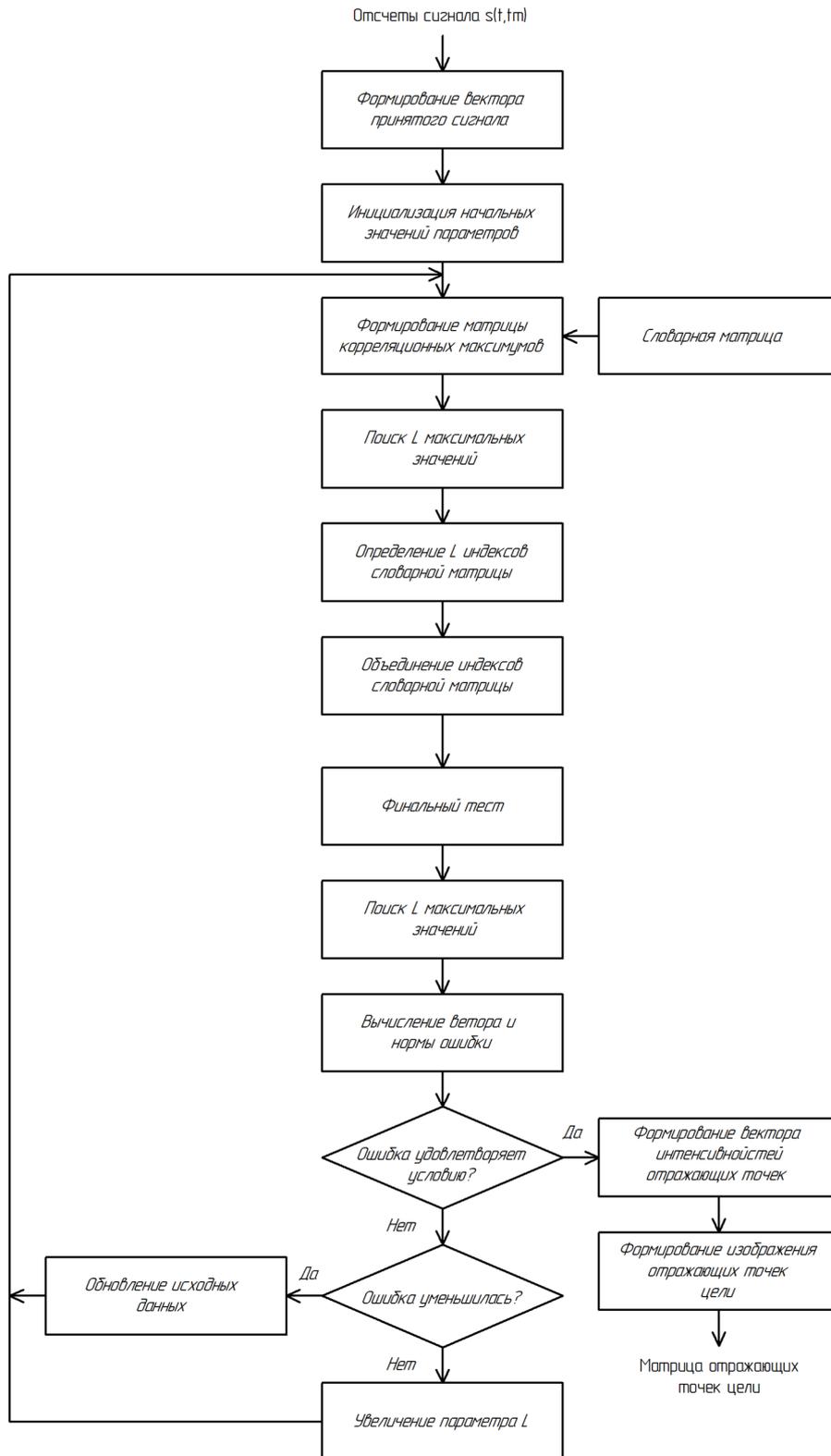


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма АА
Figure 2 – Block diagram of adaptive approximation algorithm

При появлении размытия изображения точка полученного изображения не так явно отличается от близлежащих по яркости, в худшем случае средняя разность яркости будет равна 0, тогда данную точку цели невозможно выделить на фоне окружающих точек. Поэтому наихудшее значение ОИСК равно 1, а наилучшее – 0.

Экспериментальные исследования

В качестве тестовой эталонной модели используется цель «самолет», состоящая из $L = 123$ точек в условной форме самолета, расстояние до цели принято равным 5 м. «Самолет» является сложной целью как с точки зрения количества отражающих точек, так и с точки зрения плотности их заполнения, поэтому позволяет оценить эффективность работы алгоритмов в условиях, более близких к реальным. Кроме того, необходимо учесть наличие шумов. В качестве модели шумов принят аддитивный белый гауссовский шум. Введение шума учитывается эквивалентным зашумлением эталонного изображения отражающих точек цели. Отношение сигнал-шум принято равным -10 дБ.

На рисунке 3 представлены эталонное изображение отражающих точек цели (а) и зашумленное изображение отражающих точек цели (б), а на рисунке 4 приведены результаты обработки сигнала при помощи рассмотренных алгоритмов: а) с использованием доплеровского алгоритма, б) с использованием алгоритма ОПЧО, в) с использованием алгоритма МК, г) с использованием алгоритма АА. В таблицу 1 сведены сравнительные параметры результатов работы алгоритмов без учета шумов, а в таблице 2 приведены результаты при наличии шума.

Таблица 1 – Результаты работы алгоритмов для тестовой цели «самолет» без учета шума

Table 1 – The results of the algorithms for test target «plane» without noise

Алгоритм	Значение параметра СВОЯ для цели «самолет»	Значение параметра ОИСК для цели «самолет»
Доплеровский	0,0593	0,9413
ОПЧО	0,0308	0,4653
МК	0,0031	0,0975
АА	$3,3 \cdot 10^{-15}$	$8,9 \cdot 10^{-14}$

Таблица 2 – Результаты работы алгоритмов для тестовой цели «самолет» при ОСШ=-10 дБ

Table 2 – The results of the algorithms for test target «plane» with SNR=-10dB

Алгоритм	Значение параметра СВОЯ для цели «самолет»	Значение параметра ОИСК для цели «самолет»
Доплеровский	0,0807	0,9465
ОПЧО	0,0455	0,4746
МК	0,0049	0,1622
АА	0,0022	0,0773

По рисункам 3, 4 видно, что доплеровский алгоритм приводит к смещению координат отражающих точек цели и их значительному размытию. Причина заключается в том, что за время синтезирования координаты отражающих точек смещаются как по дальности, так и по азимуту. В результате накопленная энергия отраженного сигнала от одной отражающей точки размывается в значительной области пространства. Алгоритм ОПЧО устраняет смещение точек цели и значительно снижает размытие за счет использования информации о законе изменения координаты каждой точки цели. В результате размах вариации яркости отражающих точек и средняя яркость фона увеличиваются. Поэтому параметр ОИСК уменьшается по сравнению с доплеровским алгоритмом в 2 раза.

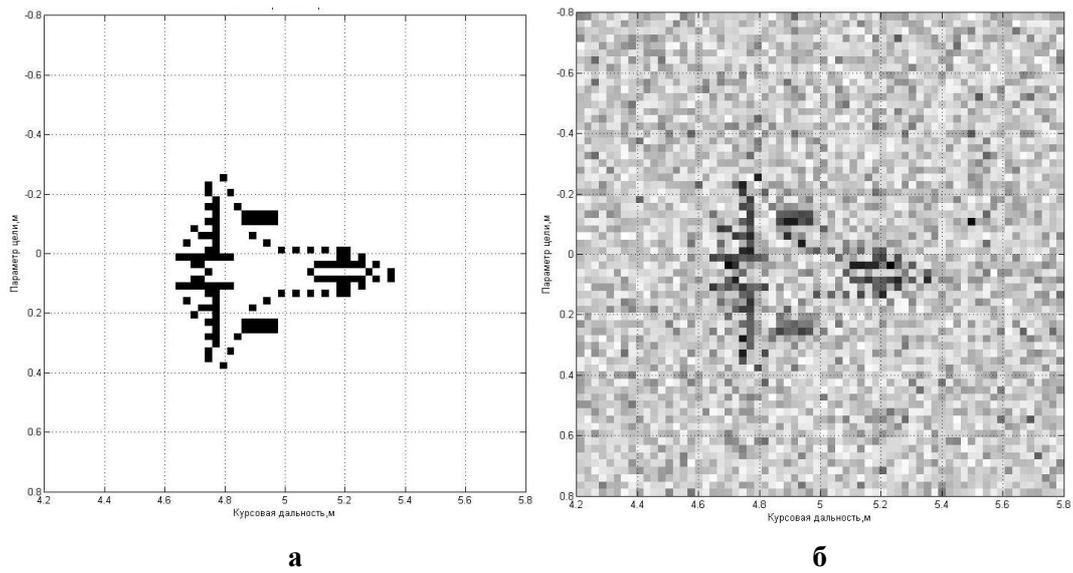


Рисунок 3 – Изображение отражающих точек цели «самолет»
Figure 3 – The original image of target «plane» reflective points

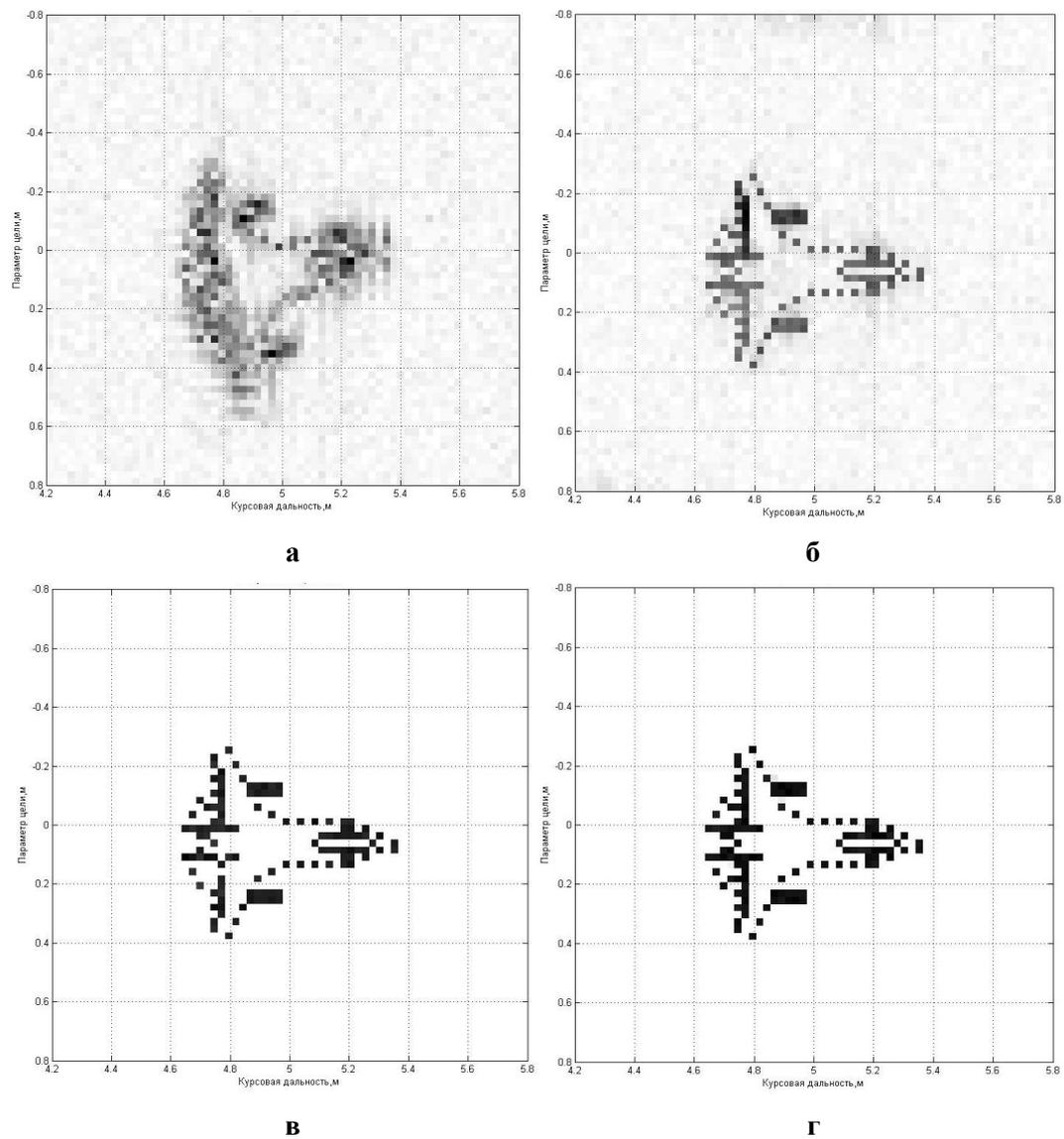


Рисунок 4 – Изображение отражающих точек цели «самолет» в результате обработки
Figure 4 – The image of target «plane» reflecting points after processing

Полученные результаты параметров сравнения для алгоритма МК на порядок меньше, чем при обработке РЛИ доплеровскими алгоритмами. Из рисунка 4 видно, что это происходит по причине потери нескольких отражающих точек в хвосте самолета, что может свидетельствовать о неправильном выборе начального параметра T для данного случая.

Сравнение результатов измерения параметров СВОЯ и ОИСК, сведенных в таблицы 1 и 2, показывает ожидаемое ухудшение качества работы всех рассмотренных алгоритмов при наличии шумов. Тем не менее алгоритм АА превосходит другие рассмотренные алгоритмы по обоим рассмотренным критериям, с его помощью достигаются наименьшие значения параметров СВОЯ и ОИСК, полученные значения параметров сравнения для него на порядок меньше, чем для доплеровских алгоритмов, и в 2 раза лучше, чем для алгоритма МК.

Полученные численные результаты подтверждаются при качественной оценке РЛИ объекта после обработки представленными алгоритмами (рисунок 4). В результате действия шума интенсивность фона для доплеровских алгоритмов увеличивается (рисунок 4, *а, б*), что ухудшает контраст отражающих точек цели. Для аппроксимирующих алгоритмов данного эффекта не наблюдается, что подтверждает их работоспособность и эффективность.

Несмотря на то, что алгоритм МК хорошо справляется с устранением шумов, часть отражающих точек остаётся найденной (рисунок 4, *в*), в то время как при обработке сигнала при помощи алгоритма АА (рисунок 4, *г*) происходит точное восстановление эталонного РЛИ цели. Избежать потери части отражающих точек получается за счет адаптивности алгоритма.

Заключение

В работе рассмотрены алгоритмы получения радиолокационного изображения сложной цели с помощью применения линейно-частотно модулированных СШП сигналов и метода инверсного синтезирования апертуры, условно разделенные на две группы. В первую группу входят алгоритмы, основанные на преобразовании Фурье, во вторую входят алгоритмы, основанные на аппроксимации принятого сигнала набором составляющих его элементарных сигналов.

Проверка эффективности предложенного алгоритма АА проводилась путем сравнения с известными решениями. Для проведения сравнения были предложены критерии эффективности, основанные на сравнении эталонного изображения отражающих точек цели и результатов работы алгоритмов. Сравнение показало, что алгоритмы, основанные на применении двумерного БПФ, на порядок уступают алгоритму АА по обоим критериям, т.е. обладают большим значением параметров СВОЯ и ОИСК, это обусловлено неизбежным наличием боковых лепестков преобразования Фурье. Предложенный алгоритм АА также превосходит в 2 раза по обоим критериям алгоритм МК, что объясняется адаптацией алгоритма при априорно неизвестном числе отражающих точек. Таким образом, предпочтительным для получения РЛИ цели является использование алгоритма АА.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 1. Основные понятия, модели и методы описания // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т.13, № 2. С. 166-194.
2. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13, № 4. С. 270-322.
3. Буй Ле Нам. Энергетические потери при пеленгации сверхширокополосных сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 20. С.117-120.
4. Радзиевский В. Г., Трифонов П. А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника. 2009. 288 с.

5. Юкин С. А., Андреев В. Г. Биспектральный анализ радиоотражений в задаче селекции наземных движущихся целей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 29. С.7-11.

6. Юкин С. А., Андреев В. Г. Формирование радиолокационного изображения подстилающей поверхности по цифровой топографической карте // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 21. С. 25-30.

7. Ultra-wideband FMCW ISAR imaging with a large rotation angle based on block-sparse recovery/ Ke Jin, Tao Lai, Gong-quan Li, Ting Wang, Yong-jun Zhao // FITEE. 2017. No. 18. pp. 2058-2069.

8. Wang, W.W., Liao, G.S., Zhang, L., et al., An imaging method based on compressive sensing for sparse aperture of SAR. Acta Electron. 2012. 40(12): pp. 2487-2494.

9. Радзиевский В. Г., Трифонов П. А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника. 2009. 288 с.

10. Горбунова А. А. Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. № 45. С. 1-20.

11. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Математическая статистика, М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2014. 352 с.

UDC 621.396.96

ADAPTIVE APPROXIMATION ALGORITHM TO OBTAIN TARGET RADAR IMAGE

A. V. Safonova, Ph.D. (Tech), associate professor RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0396-2953, e-mail: safonova.a.v@rsreu.ru

V. I. Martynov, master student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-4960-4043, e-mail: vasy97@bk.ru

The problem of constructing a radar image of complex target using ultra-wideband signals is considered. The most famous algorithms that perform this task are listed. The aim of the work is to develop a new effective algorithm for processing radio signals. An adaptive approximation algorithm to obtain target radar image is proposed. The developed algorithm is compared with previously known solutions in accordance with two efficiency criteria - the minimum of average brightness error and the minimum of relative change in average contrast. The advantages of the algorithm proposed for radar image processing in the presence of noise are proved.

Key words: *ultra-wideband signal, radar image, Doppler algorithm, back-projection algorithm in frequency domain, maximum correlation algorithm, adaptive approximation algorithm.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-23-33

References

1. Lazorenko O. V., Chernogor L. F. Sverkhshirokopolosnyye signaly i fizicheskiye protsessy. 1. Osnovnyye ponyatiya, modeli i metody opisaniya. *Radiofizika i radioastronomiya*. 2008, vol. 13, no. 2, pp.166-194. (in Russian).

2. Lazorenko O. V., Chernogor L. F. Sverkhshirokopolosnyye signaly i fizicheskiye protsessy. 2. Metody analiza i primeneniya. *Radiofizika i radioastronomiya*. 2008, vol. 13, no. 4, pp. 270-322. (in Russian).

3. Buy Le Nam. Energeticheskiye poteri pri pelengatsii sverkhshirokopolosnykh signalov. *Vestnik Ryzanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 20, pp.117-120. (in Russian).

4. Radziyevskiy V. G., Trifonov P. A. *Obrabotka sverkhshirokopolosnykh signalov i pomekh*. М.: Radiotekhnika. 2009. 288 p. (in Russian).

5. Yukin S. A., Andreyev V. G. Bispektral'nyy analiz radiootrazheniy v zadache selektsii nazemnykh dvizhushchikhsya tseley. *Vestnik Ryzanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2009, no. 29, pp.7-11. (in Russian).

6. **Yukin S.A., Andreyev V.G.** Formirovaniye radiolokatsionnogo izobrazheniya podstilayushchey poverkhnosti po tsifrovoy topograficheskoy karte. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 21, pp. 25-30. (in Russian).
7. Ultra-wideband FMCW ISAR imaging with a large rotation angle based on block-sparse recovery / Ke Jin, Tao Lai, Gong-quan Li, Ting Wang, Yong-jun Zhao. *FITEE*. 2017. no. 18. pp. 2058-2069.
8. **Wang W.W., Liao G.S., Zhang L., et al.** An imaging method based on compressive sensing for sparse aperture of SAR. *Acta Electron.* 2012. no. 40(12): pp. 2487-2494.
9. **Radziyevskiy V. G., Trifonov P. A.** *Obrabotka sverkhshirokopolosnykh signalov i pomekh*. Moscow: Radiotekhnika. 2009. 288 p. (in Russian).
10. **Gorbunova A. A.** Razrabotka algoritma polucheniya tochechnogo portreta slozhnoy tseli po kompleksnomu radiolokatsionnomu izobrazheniyu. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»*. 2011, no. 45, pp.1-20. (in Russian).
11. **Ivchenko G. I., Medvedev Yu. I.** *Matematicheskaya statistika*. Moscow: Knizhnyy dom «LIBRO-KOM». 2014. 352 p. (in Russian).