

УДК 621.396

ДЕКОРРЕЛЯЦИЯ СИГНАЛА ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В ВЫСОКОИНФОРМАТИВНОМ РАДИОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

Радионович В.В., аспирант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Козлов С.В. – доктор техн. наук

Аннотация. Показано, что при обнаружении движущихся целей радиолокаторами с синтезированием апертуры авиационного или космического базирования при высоком разрешении по продольной и поперечной дальности возникает эффект декорреляции сигнала от земной поверхности. Из-за компенсации миграции дальности для движущейся цели происходит последовательное замещение сигнала в элементе разрешения по дальности сигналами, отраженными от элементов земной поверхности на разных дальностях, и пропорциональное уменьшение времени корреляции флуктуаций отраженного от земной поверхности сигнала. При разрешающей способности по наклонной дальности 1 метр и радиальной скорости движущегося объекта 50...200 м/с время корреляции флуктуаций составит 20...5 мс. На радиолокационном изображении в координатах «наклонная-поперечная дальность» изображения неподвижных объектов с большой отражающей способностью будут наблюдаться в виде прямоугольников с одинаковым числом пикселей по наклонной и поперечной дальности. Время корреляции флуктуаций сигнала от неподвижного отражателя обратно пропорционально его радиальной скорости и ширине спектра зондирующего сигнала РСА.

Ключевые слова. Синтезирование апертуры, движущийся объект, миграция дальности, земная поверхность, декорреляция, ширина спектра флуктуаций .

Постановка задачи. Для обнаружения движущихся воздушных объектов (самолетов, вертолетов, беспилотных летательных аппаратов) в настоящее время могут быть использованы радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА) авиационного и космического базирования [1-4]. РСА космического базирования также предлагается использовать для обнаружения и определения параметров движения искусственных спутников Земли (ИСЗ и космического мусора) [5].

Для таких объектов возникают дополнительные (собственные), не связанные с перемещением носителя РСА радиальное V_{0r} и тангенциальная V_{0t} скорости взаимного перемещения объекта и

РСА, радиальное ускорение a_r и, в некоторых случаях, производная радиального ускорения a'_r .

Алгоритмы обработки траекторного сигнала для указанного случая, например [], предусматривают компенсацию миграции дальности и частоты, обусловленную собственными параметрами движения объекта относительно РСА, и построение радиолокационных изображений объектов в координатах наклонная/поперечная дальность при когерентном накоплении отраженного от движущегося объекта сигнала.

При обнаружении движущихся объектов в элементе разрешения, наряду с внутренними шумами, будут присутствовать отражения от земной поверхности. Влияние отраженного от земной поверхности сигнала хорошо изучено применительно к процессу обнаружения движущегося с относительно небольшой (единицы-десятки м/с) скоростью наземного объекта [1]. При обнаружении такого объекта с использованием РСА со средней (3-25 м) разрешающей способностью по дальности в одном элементе разрешения будут находиться отраженные сигналы от объекта и от элемента земной поверхности, отнесенного по углу на величину $\arcsin(V_{0r} / V_{pca})$, где V_{pca} - скорость носителя РСА.

Сигналы от объекта и от земной поверхности накапливаются когерентно, поэтому отношение сигнал/земная поверхность определяется отношением ЭПР объекта к ЭПР разрешаемого участка земной поверхности. Наличие на наблюдаемой радиолокационной сцене значительного числа неподвижных объектов с большой ЭПР (например, стоящих автомобилей, металлических конструктивных элементов дорожной инфраструктуры, освещения, электропередачи и т.д.) приводит к невозможности достоверного обнаружения движущихся объектов на радиолокационном изображении.

Одним из основных направлений развития РСА является повышение разрешающей способности по дальности до 1 м, а в перспективе до 0,25 м. При указанной разрешающей способности и компенсации миграции дальности для движущегося воздушного объекта или ИСЗ условие для когерентного накопления сигналов, отраженных от земной поверхности, нарушаются.

Эти эффекты недостаточно описаны в литературе, что и определяет цель настоящей статьи.

Выявление закономерностей. Для выявления основных закономерностей использовалась компьютерная модель высокоинформативного РСА космического базирования для маршрутного и детального режимов радиолокационной съемки. Модель реализована в пакете прикладных программ MATLAB представляет собой набор выполняемых в определенном порядке отдельных модулей-скриптов.

В головном скрипте (*main.m*) задаются исходные данные для моделирования, управляющие переменные – «флаги» для переключения между различными режимами вычислений, задается траектория космического аппарата, формируется наблюдаемая сцена из блестящих точек земной поверхности, неподвижных и движущихся объектов, рассчитывается мощность отраженного от них сигналов, начальные дальности, радиальные скорости, ускорения и производные радиальных ускорений между фазовыми центрами передающей и интерферометрических приемных антенн.

С использованием скриптов *CalcSigShortTime.m* и *AirplaneModel.m* выполняется расчет траекторного сигнала для одного или двух интерферометрических приёмных каналов и одного передающего канала с формированием внутривременных спектров принимаемых сигналов. Движущиеся наземные объекты представляются в виде совокупности блестящих точек на «жестком» каркасе, условный центр которого движется прямолинейно и равномерно. Для воздушных объектов также используется модель из совокупности блестящих точек на жестком каркасе, но дополнительно к равномерному прямолинейному движению центра масс объекта воспроизводятся колебательные движения объекта по курсу, крену и тангажу с заданными амплитудами A_{Oz}, A_{Ox}, A_{Oy} , периодами повторения A_{Oz}, A_{Ox}, A_{Oy} и случайными начальными фазами.

Скрипт *CalcRliXY.m* используется для построения радиолокационного изображения с использованием алгоритма *BackProjection* с передискретизацией по быстрому времени в спектральной области. Особенностью используемого алгоритма является фокусировка РЛИ для каждой точки земной поверхности с использованием ее декартовых или географических координат. Это позволяет получать РЛИ с любой дискретностью и максимально возможным качеством. При построении РЛИ для двух интерферометрических приемных каналов, разнесенных по линии пути, с дополнительной компенсацией фазовых сдвигов реализуются алгоритмы *MTI* (*moving track indicator*) селекции движущихся объектов в вариантах построения разностного РЛИ или оценки разности фаз пикселей (отсчетов) комплексных РЛИ.

Скрипт *CalcRliDnDp.m* реализует алгоритм *MTD* (*moving track detection*) построение РЛИ движущихся воздушных объектов в координатах наклонная дальность – поперечная дальность с компенсацией миграции дальности и частоты в соответствии с предполагаемыми параметрами изменения дальности между РСА и центром масс цели. Для обзора по указанным параметрам используется многоканальная обработка. Визуализация результатов обработки проводится путем построения трехмерных амплитудных РЛИ приемных каналов и разностного РЛИ при квадратичном и линейном детектировании и соответствующих яркостных РЛИ в градациях серого или цветовой раскраске.

На рисунке 1 приведены РЛИ неподвижного точечного объекта, полученные при синтезировании алгоритмом *MTI* в координатах xOy и алгоритмом *MTD* в координатах «наклонная дальность – поперечная дальность» при наличии шумов. Все зависимости построены для РСА космического базирования при дальности 700 км, орбитальной скорости 7612 м/с, времени синтезирования 0,4 с и ширине спектра сигнала 150 МГц. Несмотря на различия систем координат (для рис. 1а построение с дискретностью 1 м по осям, для рисунка 1б дискрет наклонной дальности эквивалентен 1 м, дискрет по путевой дальности 4,4 метра), хорошо видно сходство получаемых изображений.

На рис. 2 и 3 приведены сформированные алгоритмом *MTD* изображения движущегося со скоростями $V_x=100$ м/с и $V_x=200$ м/с, соответственно, объекта с ЭПР 10 м² и неподвижного объекта с ЭПР 100 м² (для лучшего выявления эффектов зависимости построены без внутренних шумов). Отклик для движущегося объекта имеет игольчатый характер и соответствует одному элементу разрешения по наклонной/поперечной дальности. Для неподвижного объекта отклик имеет вид прямоугольника по наклонной дальности и путевой дальности. Указанное «расплывание» отклика определяется процессам компенсации миграции дальности для движущегося объекта: на интервале синтезирования продолжительностью $T_c=0,4$ с алгоритм построения РЛИ (сжатия траекторного сигнала) компенсирует перемещение объекта, связанное с его дополнительной радиальной скоростью $V_r=67$ м/с (рисунок 2).

Это перемещение составит $T_c V_r = 27$ м, что при ширине спектра сигнала 150 МГц и такой же частоте дискретизации, соответствует 27 отсчетам по наклонной дальности. Измерения на рисунке 2б дают именно такой результат как по длине прямоугольника, занятого откликом, так и по его ширине, в числе отсчетов комплексного РЛИ.

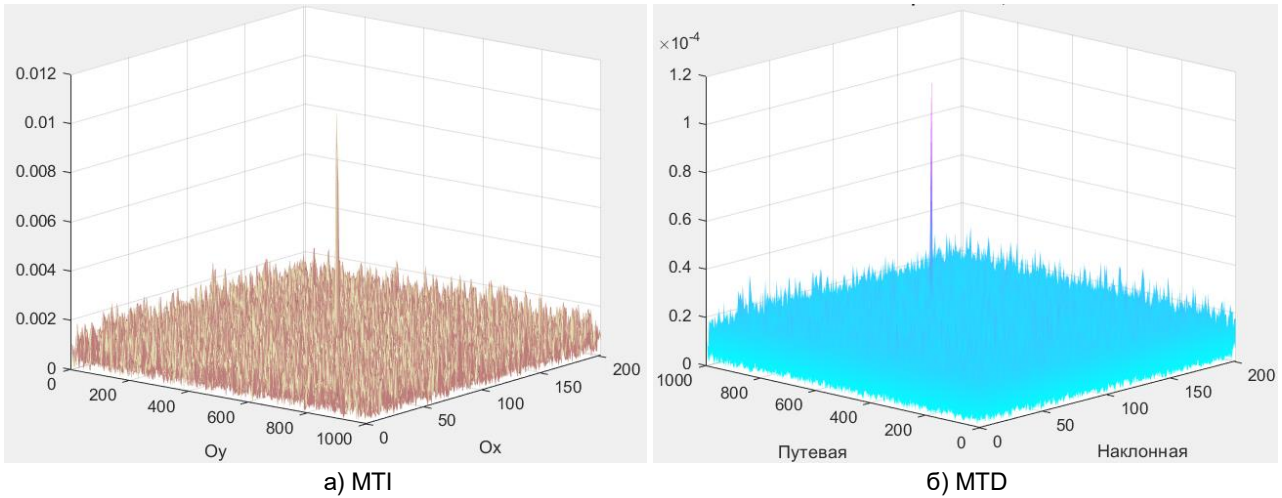
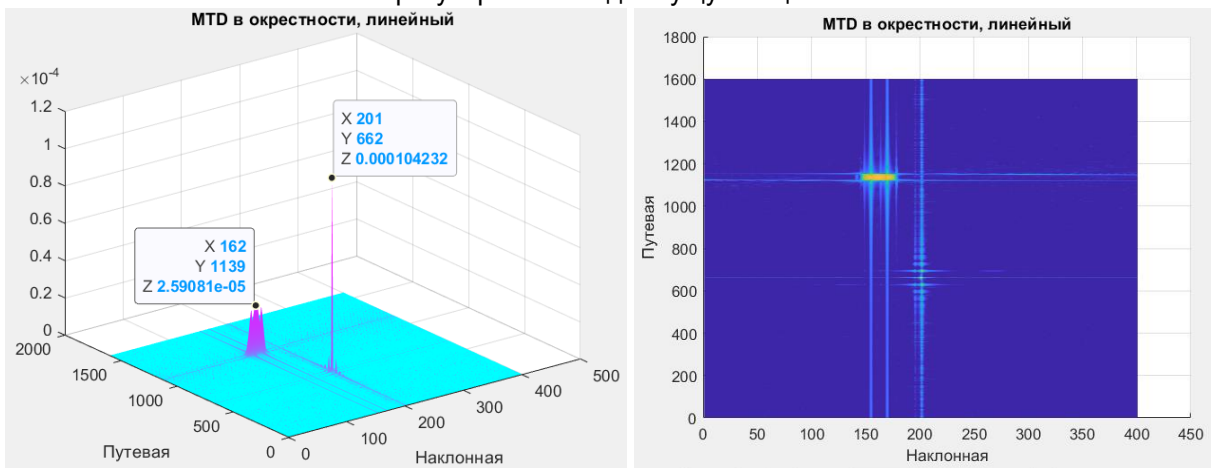


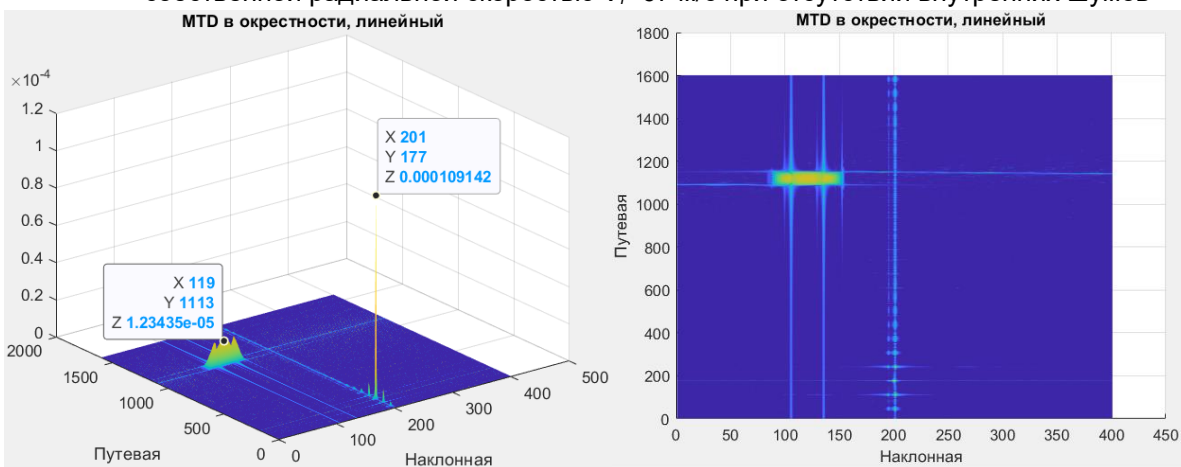
Рисунок 1 – РЛИ неподвижной точечной цели, сформированные алгоритмами МТИ и МТД с фокусировкой на движущуюся цель



а) трехмерное амплитудное РЛИ в логарифмическом масштабе

б) РЛИ в градациях яркости и цветовой раскраске

Рисунок 2 – РЛИ неподвижной точечной цели с ЭПР 100 м² и движущейся цели с ЭПР 10 м² и собственной радиальной скоростью $V_r=67$ м/с при отсутствии внутренних шумов



а) трехмерное РЛИ в логарифмическом масштабе

б) РЛИ в градациях яркости и цветовой раскраске

Рисунок 3 – РЛИ неподвижной точечной цели с ЭПР 100 м² и движущейся цели с ЭПР 10 м² и собственной радиальной скоростью $V_r=134$ м/с при отсутствии внутренних шумов

При увеличении в два раза радиальной скорости цели (рисунок 3) амплитуда отклика от движущейся цели осталась практически неизменной, то есть когерентное накопление эффективно, но размер отклика от неподвижной цели стал больше в два раза как по наклонной, так и по поперечной дальности, то есть число элементов разрешения увеличилось в 4 раза по сравнению с рисунком 2. Амплитуда отклика уменьшилась в $\sqrt{4} = 2$ раза, что точно соответствует результатам моделирования.

Число отсчетов, занимаемых откликом по медленному времени, определяется следующими соображениями. Если бы разрешающая способность по дальности была низкой и сигнал в пределах времени T_c оставался бы в пределах одного элемента разрешения по дальности, то накопление такого отраженного от неподвижного объекта сигнала, осуществляется в диапазоне однозначных доплеровских сдвигов частоты $[-F_r / 2; F_r / 2]$ когерентно. При высоком разрешении по дальности при компенсации миграции дальности происходит замещение одних элементов разрешения другими. Временя полного замещения, которое можно трактовать как время $\tau_{3П}$ корреляции флуктуаций сигнала, отраженного от земной поверхности, составляет

$$\tau_{3П} = \frac{\Delta r}{V_r} = \frac{c}{2V_r \Delta f_0}, \quad (1)$$

и при использованных для рисунка 3 условиях, $\tau_{3П} = 15$ мс. При увеличении радиальной скорости цели время корреляции сигнала, отраженного от земной поверхности, уменьшается.

Таким образом, при обнаружении движущихся воздушных объектов РСА с высоким разрешением по дальности с использованием алгоритмов *MTD* будет наблюдаться декорреляция сигналов от разрешаемых элементов земной поверхности и неподвижных наземных объектов. На амплитудных РЛИ указанная декорреляция проявляется в том, что отклик от единственного неподвижного отражателя будет приближенно иметь форму прямоугольника с одинаковым числом отсчетов по наклонной и поперечной дальности. Время корреляции флуктуаций сигнала от неподвижного отражателя обратно пропорционально его радиальной скорости и ширине спектра зондирующего сигнала РСА.

Для радиолокационной сцены с заданным числом высококонтрастных неподвижных объектов они будут хорошо наблюдаться на амплитудных РЛИ, построенных с использованием стандартных алгоритмов картографирования. При обнаружении движущихся воздушных объектов и высоком разрешении по дальности формируемые алгоритмом *MTD* радиолокационные изображения будут характеризоваться понижением контрастности (усреднением) радиолокационного фона, создаваемого земной поверхностью, неподвижными и медленно движущимися наземными объектами. Это облегчает обнаружение движущихся объектов.

Отношение сигнал/шум по движущемуся объекту. Пусть движущийся объект представляет собой точечную радиолокационную цель с ЭПР σ_{mt} . Тогда накопление сигнала от объекта будет когерентным на всем интервале наблюдения, а накопление сигнала от земной поверхности (неподвижного объекта) – когерентным на интервале $\tau_{3П}$, определяемом (1). Запишем, с использованием выявленных при тестировании закономерностей, отношение сигнал/земная поверхность при обнаружении точечной цели, в зависимости от времени синтезирования и ширины спектра зондирующего сигнала.

ЭПР земной поверхности в элементе разрешения при интервале когерентного накопления (времени наблюдения) $\tau_{3П}$ составит

$$\sigma_{3П} = \sigma_{уд} \frac{\Delta r}{\sin \theta} \Delta r_{\perp} = \sigma_{уд} \frac{c}{2\Delta f_0 \sin \theta} \frac{\lambda H}{2V_{pca} \tau_{3П} \cos \theta} = \frac{\sigma_{уд} \lambda H}{\sin 2\theta} \frac{V_r}{V_{pca}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{уд}$ - удельная ЭПР земной поверхности; θ - угол отклонения направления наблюдения от надира; H - высота орбиты РСА; λ - длина волны; V_{pca} - орбитальная скорость РСА.

Сигнал, формируемый указанной ЭПР, имеет ширину спектра флуктуаций

$$\Delta f_c = \frac{1}{2\tau_{3П}} = \frac{V_r \Delta f_0}{c}. \quad (3)$$

При полностью когерентном накоплении сигнала от движущегося объекта в течении времени T_c отношение мощностей сигнала движущего объекта к мощности фона от земной поверхности на выходе когерентного накопителя составит

$$\rho = \frac{\sigma_{mt}}{\sigma_{зп} \frac{\Delta F_{KN}}{\Delta f_c}} = \frac{\sigma_{mt}}{\frac{\sigma_{уд} \lambda H}{\sin 2\theta} \frac{V_r}{V_{pca}} \frac{c}{V_r \Delta f_0 T_c}} = \frac{\sigma_{mt} \sin 2\theta V_{pca} T_c}{2\sigma_{уд} \lambda H \Delta r}, \quad (4)$$

где $\Delta F_{KN} = 1/T_c$ - ширина зубца амплитудно-частотной характеристики когерентного накопителя.

Как следует из (4), величина ρ прямо пропорциональна отношению расстояния, пролетаемого РСА за время синтезирования, к разрешающей способности по наклонной дальности. Чем выше разрешающая способность по дальности (меньше Δr), тем больше отношение сигнал/фон и тем лучше выделяется движущийся объект на формируемом радиолокационном изображении. Об этом же свидетельствуют и результаты моделирования на рисунках 2 и 3.

Для характерного случая $\sigma_{уд} = 0,01 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $\theta = 45^\circ$; $H = 500 \text{ км}$; $\lambda = 3,125 \text{ см}$; $V_{pca} = 7612 \text{ м/с}$; $\sigma_{mt} = 10 \text{ м}^2$ получим $\rho = 97$, что вполне достаточно для обнаружения.

Заключение. Эффект декорреляции сигналов, отраженных от земной поверхности, в высокоинформативном РСА необходимо учитывать при обосновании параметров обработки сигналов, отраженных от движущихся объектов, и обнаружении таких объектов на формируемых РЛИ.

Список использованных источников

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Арутюнов, А.А. Обнаружение воздушных объектов радиолокаторами с синтезированной апертурой космических систем дистанционного зондирования Земли / А.А. Арутюнов, В.Э. Гуляков, А.Б. Землянов // Морская радиоэлектроника, №1, 2008. – С. 10-12.
3. Perry R.P., Dipietro R.C., Fante R.L. SAP imaging of moving targets // IEEE Transactions AES, 1999, vol. 35, №1. Pp. 188-199.
4. Григас, С.Э., Литовченко Д.Ц., Скорынин А.А. Оценка возможности обнаружения малоконтрастных воздушных целей с использованием космической радиолокации / С.Э. Григас, Д.Ц. Литовченко, А.А. Скорынин // Антенны, №1, 2013. – С. 66-68.
5. Лобжанидзе, Д.Т. Обнаружение воздушных объектов посредством космических РЛС / Д.Т. Лобжанидзе, В.В. Сазонов // Сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь RLNC-2014», НПФ «САКВОЕЕ», 15-17 апреля 2014, т. 3. – С. 1459-1463.

UDC 621.396

DECORRELATION OF A SIGNAL FROM THE EARTH'S SURFACE DURING DETECTION OF MOVING OBJECTS IN A HIGHLY INFORMATIVE SPACE SYNTHETIC APERTURE RADAR

Radionovich V.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V. – Doctor of Science in Physics and Mathematics

Annotation. It is shown that when moving targets are detected by aircraft or space-based aperture synthesis radars with high resolution in longitudinal and transverse range, the effect of decorrelation of the signal from the earth's surface occurs. Due to the range migration compensation for a moving target, the signal in the range resolution element is sequentially replaced by signals reflected from elements of the earth's surface at different distances, and the correlation time of fluctuations of the signal reflected from the earth's surface decreases proportionally. With a slant range resolution of 1 meter and a moving object radial velocity of 50...200 m/s, the fluctuation correlation time will be 20...5 ms. On the radar image in the "slant-transverse range" coordinates, images of stationary objects with high reflectivity will be observed in the form of rectangles with the same number of pixels along the slant and transverse ranges. The correlation time of signal fluctuations from a stationary reflector is inversely proportional to its radial velocity and the width of the spectrum of the probing SAR signal.

Keywords. Aperture synthesis, moving object, range migration, earth's surface, decorrelation, fluctuation spectrum width.