

УДК 621.396.96

СПОСОБ АДАПТИВНОЙ КОГЕРЕНТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ СИГНАЛА ОТРАЖЕННОГО ОТ КОРПУСА АВТОМОБИЛЯ ПРИ ОБРАЩЕННОМ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

А.С. ГЕЙСТЕР

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 21 февраля 2013

Задача распознавания класса движущегося наземного объекта в радиолокационных системах мониторинга по-прежнему остается актуальной из-за своей сложности. Одним из путей ее решения является получение радиолокационного изображения колесно-гусеничного тракта в ходе синтеза апертуры антенны. Однако на формирование такого изображения оказывают негативное влияние сигналы, отраженные от корпуса транспортного средства. Рассматривается новый способ адаптивной когерентной компенсации сигналов, отраженных от корпуса транспортного средства, основанный на выделении радиолокационного изображения корпуса, его обратного преобразования во временную структуру и вычитании из принятого сигнала.

Ключевые слова: синтез апертуры антенны, автомобиль, адаптивная компенсация.

Введение

Практика радиолокации в приложении к мониторингу движущейся наземной техники включает решение традиционных задач: обнаружения, измерения координат и распознавания класса. Наиболее сложной из них является задача распознавания класса, которая в приложении к мониторингу наземной техники формулируется как разделение техники на два основных класса (колесная техника и гусеничная техника). Эта задача может решаться разными способами, однако одним из наиболее эффективных является сравнительно новый способ, основанный на синтезе апертуры антенны (САА). В течение нескольких последних лет этот способ разрабатывается в нашей республике [1,2] применительно к мониторингу дорожного движения с использованием радиолокационных датчиков с обращенным синтезом апертуры антенны (ОСАА). Разработки в этом направлении выполняются в ходе последнего десятилетия и за рубежом [3,4].

Использование специального ОСАА [1,2] позволяет построить радиолокационное изображение колеса и, следовательно, получить информацию о количестве и расположении колес (мостов) вдоль корпуса автомобиля. Это открывает возможности для более детальной классификации автомобилей. Предварительные исследования показали, что на практике качество построения радиолокационного изображения колеса существенно снижается из-за проникновения в каналы обработки [2] сигналов отражений от корпуса автомобиля, которые в десятки – сотни раз превышают мощность сигналов, отраженных от колес. Это проникновение происходит через боковые лепестки амплитудно-частотных (пространственно-скоростных) характеристик каналов обработки, формирующих изображение колеса.

Таким образом, в основе обеспечения высокого качества формирования радиолокационного изображения колес лежит устранение или существенное снижение влияния мощных сигналов, отраженных от корпуса автомобиля.

Обоснование нового способа адаптивной когерентной компенсации сигнала от корпуса

Сигнал, отраженный от движущегося автомобиля и принятый неподвижным радиолокатором, представляет собой сумму сигналов

$$u_M(t) = u_K(t) + \sum_{q=1}^Q u_q(t), \quad (1)$$

где $u_K(t)$ – сигнал, отраженный от корпуса автомобиля; $u_q(t)$ – сигнал, отраженный от q -го колеса, число которых равно Q .

Сигналы, отраженные от корпуса и колес автомобиля, будем представлять в виде сумм сигналов от дискретных изотропных отражателей, которыми аппроксимируются поверхности корпуса и колес. Для такого представления на коротком интервале времени, соответствующем времени ОСАА, сигналы, отраженные от дискретных отражателей, являются медленно флуктуирующими, и можно полагать, что время корреляции флуктуаций комплексной огибающей каждого отдельного отраженного сигнала превышает время САА. Соответственно, изменения амплитуды и фазы отраженных сигналов будут определяться только изменением дальности до соответствующих отражателей. С учетом этого сигнал от корпуса автомобиля с момента начала наблюдения ($t=0$) может быть представлен [3] суммой сигналов от N_K отражателей на поверхности корпуса:

$$u_K(t) = \sum_{n=1}^{N_K} E_n U_L(t - t_{r,n}(t)) \exp[i(\omega_0 t + \varphi_n(t))], \quad (2)$$

где E_n – амплитуда сигнала, отраженного от n -го отражателя; $U_L(t)$ – комплексный закон модуляции ограниченной временем САА последовательности из L одиночных зондирующих сигналов (ЗС); $t_{r,n}(t) = 2r_n(t)/c$ – время задержки сигнала, отраженного от n -го отражателя; ω_0 – круговая частота ЗС; $\varphi_n(t) = 2kr_n(t)$ – закон изменения фазы сигнала, отраженного от n -го отражателя, в соответствии с измерением расстояния $r_n(t)$ от фазового центра антенны радиолокатора (РЛ) до центра n -го отражателя на корпусе; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; c и λ – скорость распространения и длина волны ЗС соответственно.

Аналогично сигнал, отраженный от q -го колеса автомобиля, с момента начала наблюдения при $t=0$ может быть представлен [1] в виде суммы сигналов от N_C отражателей на поверхности колеса:

$$u_q(t) = \sum_{k=1}^{N_C} E_{q,k} U_L(t - t_{r,q,k}(t)) \exp[i(\omega_0 t + \varphi_{q,k}(t))], \quad (3)$$

где $E_{q,k}$ – амплитуда сигнала, отраженного от q,k -го отражателя на поверхности q -го колеса; $t_{r,q,k}(t) = 2r_{q,k}(t)/c$ – время задержки сигнала, отраженного от q,k -го отражателя; $\varphi_{q,k}(t) = 2kr_{q,k}(t)$ – закон изменения во времени t фазы сигнала, отраженного от q,k -го отражателя, в соответствии с изменением расстояния $r_{q,k}(t)$ от фазового центра антенны РЛ до центра q,k -го отражателя.

Из выражений (2) и (3) следует, что временное разделение сигналов, отраженных от отдельного колеса и корпуса автомобиля, за счет сверхразрешения по дальности не представляется возможным, так как колеса размещаются в пределах корпуса автомобиля. Кроме того, первичный анализ, проведенный в [1], указывает на то, что спектры этих сигналов с учетом согласованного движения корпуса и центра колеса также пересекаются.

Для снижения влияния сигналов корпуса на построение изображения колеса предлагается выделить сигнала корпуса путем ОСАА, адаптивного к параметрам движения автомобиля, а затем выполнить его вычитание из принятого сигнала. Очевидно, что наилучшее качество компенсации для этого нового способа ожидается при использовании алгоритма ОСАА с полной фокусировкой в каждую точку корпуса автомобиля [5].

Представленное обоснование позволяет описать последовательность действий при реализации предлагаемого способа адаптивной компенсации сигнала корпуса, которая включает следующие этапы:

- адаптация алгоритма ОСАА по корпусу к параметрам движения автомобиля;
- ОСАА по корпусу в течение анализируемого временного фрагмента, в результате которого формируется радиолокационное изображение корпуса автомобиля в азимутальной плоскости;
- выделение на полученном изображении радиолокационного портрета (РЛП) корпуса автомобиля в виде совокупности комплексных амплитуд сигналов, принадлежащих элементам разрешения на поверхности корпуса;
- обратное преобразование выделенного РЛП корпуса во временную реализацию сигнала корпуса и вычитание ее из временной реализации исходного принятого сигнала.

Полученная в результате этапа 4 временная реализация принятого сигнала, в которой сигнал корпуса скомпенсирован, используется для построения изображения колесного тракта.

Алгоритм адаптивной когерентной компенсации сигнала от корпуса

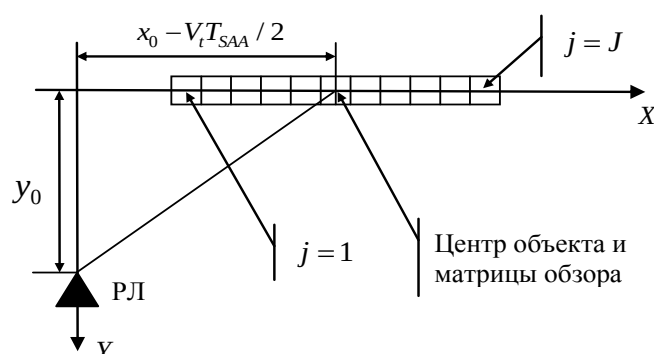
На основе описанной выше последовательности действий при реализации предложенного способа может быть разработан алгоритм адаптивной когерентной компенсации сигнала корпуса.

Рассмотрим вначале особенности ОСАА при построении радиолокационного изображения корпуса автомобиля. Суть такого ОСАА с полной фокусировкой [3] заключается в формировании матрицы обзора в виде набора синтезированных диаграмм направленности (элементов разрешения), равномерно расставленных вдоль объекта максимальной протяженности. В каждом элементе матрицы осуществляется когерентное суммирование принятых сигналов после компенсации набега фазы для центра элемента разрешения за период дискретизации принятого сигнала. В результате формируется азимутальный РЛП, представляющий собой совокупность комплексных амплитуд сигналов, относящихся к различным элементам разрешения вдоль линии движения автомобиля.

Заметим, что ОСАА с полной фокусировкой выполняется после адаптации к условиям наблюдения, которая включает следующее: обнаружение автомобиля, определение местоположения центра корпуса автомобиля в системе координат РЛ на момент начала синтеза, измерение абсолютной скорости автомобиля V_t .

В неподвижном РЛ ОСАА с полной фокусировкой выполняется следующим образом (см. рисунок):

- в соответствии с величиной скорости V_t и расположением центра корпуса определяются параметры алгоритма ОСАА;
- в пределах физической диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛ относительно центра автомобиля вправо и влево разворачивается матрица обзора, реализуемая набором из J синтезированных ДНА.



Графическое пояснение ОСАА с полной фокусировкой по корпусу

Для сокращения математических выкладок введем ограничение: ОСАА (см. рисунок) проводится только для значений $x \geq 0$. С учетом этого скорость автомобиля при приближении к точке $x=0$ имеет знак минус ($V_t < 0$), а при удалении от нее – знак плюс ($V_t > 0$). Соответственно в момент начала синтеза апертуры находится на оси OX в точке $(x_0 - V_t T_{SAA} / 2)$. С учетом введенного непринципиального ограничения ($x \geq 0$) алгоритм ОСАА с полной фокусировкой можно представить в виде:

$$\xi_j = \sum_{n=0}^{N-1} U_{M_n} H_n \exp \left[-i2k \sqrt{y_0^2 + \left(x_0 - V_t \frac{T_{SAA}}{2} - \frac{J}{2} \Delta x + j \Delta x + V_t n T_d \right)^2} \right], j = \overline{1, J}, \quad (4)$$

где ξ_j – комплексная амплитуда сигнала, формируемого в j -ой синтезированной ДНА (элементе разрешения матрицы обзора); n – номер временного отсчета; $U_{M_n}, n = \overline{0, (N-1)}$ – отсчеты комплексной огибающей принятого сигнала; $H_n, n = \overline{0, (N-1)}$ – весовые коэффициенты, определяемые видом весовой функции [6] для требуемого уровня боковых лепестков синтезируемых ДНА; T_{SAA} – интервал ОСАА, имеющий в данном случае значение $T_{SAA} = T_d N$; T_d – интервал дискретизации принятого сигнала по времени.

С учетом введенных пояснений алгоритм адаптивной когерентной компенсации сигнала от корпуса включает следующую последовательность операций.

Операция 1. Обнаружение автомобиля, определение его местоположения относительно РЛ, определение абсолютного значения скорости V_t . На основе полученных данных выполняется адаптация алгоритма ОСАА по корпусу к параметрам движения автомобиля.

Операция 2. ОСАА с полной фокусировкой по корпусу, адаптированный к местоположению и параметрам движения автомобиля. ОСАА выполняется по выборке принятого сигнала $u_M(kT_d), k = \overline{0, N-1}$, причем $NT_d = T_{SAA}$. В результате САА формируется радиолокационное изображение, в котором присутствует РЛП автомобиля.

Операция 3. Выделение в радиолокационном изображении, полученном в ходе операции 2, РЛП корпуса автомобиля. Выделение выполняется в виде определения границ в виде номеров каналов левой границы L_1 и правой границы L_2 , в которых присутствуют сигналы, отраженные от элементов корпуса. В итоге выделяется РЛП корпуса автомобиля ξ_K в виде совокупности комплексных амплитуд $\xi_K = \{\xi_l, l = \overline{L_1, L_2}\}$.

Операция 4. Обратное преобразование выделенного портрета корпуса во временную реализацию сигнала, отраженного от корпуса автомобиля, $\tilde{u}_K(kT_d)$ в виде:

$$\tilde{u}_K(kT_d) = \sum_{l=L_1}^{L_2} \xi_l H_k^{-1} \exp[i2kr_l(kT_d)], k = \overline{0, N-1}, \quad (5)$$

где $r_l(kT_d)$ – дальность до вертикального сечения корпуса автомобиля l -ой синтезированной ДНА в k -ом временном отсчете временного фрагмента обрабатываемого принятого сигнала.

Дальность $r_l(kT_d)$ рассчитывается в соответствии с выражением:

$$r_l(kT_d) = \sqrt{y_0^2 + \left(x_0 - V_t \frac{T_{SAA}}{2} - \frac{J}{2} \Delta x + l \Delta x + V_t k T_d \right)^2}, \quad (6)$$

в котором в соответствии с введенным ранее ограничением (ОСАА (в соответствии с рисунком) проводится только для значений $x \geq 0$) скорость автомобиля при приближении к точке $x=0$ имеет знак минус ($V_t < 0$), а при удалении от нее – знак плюс ($V_t > 0$).

Операция 5. Вычитание выделенного сигнала корпуса $\tilde{u}_K(kT_d), k = \overline{0, N-1}$ из временной реализации исходного принятого сигнала $u_M(kT_d), k = \overline{0, N-1}$ и формирование выборки принятого сигнала $\tilde{u}_M(kT_d), k = \overline{0, N-1}$, в котором скомпенсирован сигнал корпуса автомобиля:

$$\tilde{u}_M(kT_d) = u_M(kT_d) - \tilde{u}_K(kT_d), k = \overline{0, N-1}. \quad (7)$$

Сигнал $\tilde{u}_M(kT_d)$, $k = \overline{0, N-1}$ является конечным результатом работы алгоритма компенсации сигнала корпуса, который используется далее для построения изображения колесного тракта.

Заключение

Для снижения влияния мощного сигнала, отраженного от корпуса автомобиля, на формирование радиолокационного изображения колеса предложен новый способ адаптивной когерентной компенсации, основанный на выделении сигнала корпуса путем обращенного синтеза апертуры антенны. Предварительные результаты моделирования показали реализуемость и высокую эффективность предложенного способа. Разработанный способ может быть использован как в наземных РЛ мониторинга дорожного движения, так и в РЛ воздушного базирования, в которых решается задача обнаружения и классификации движущейся наземной техники.

METHOD FOR ADAPTIVE COHERENT COMPENSATION OF SIGNAL REFLECTED FROM CAR BODY

A.S. HEISTER

Abstract

Classification of ground vehicles is still actual task in radar systems due to its complexity. ISAR imaging of wheels and tracks of vehicles is effective way for vehicle classification. Signals reflected from vehicle body adversely affect the imaging procedure. Method for adaptive coherent compensation of signal reflected from car body is considered. The method is based on ISAR imaging of vehicle body, transformation of achieved image to temporal signal and its subtraction of received signal.

Список литературы

1. Гейстер А.С. // Докл. БГУИР. 2011. № 1 (55). С. 38–42.
2. Гейстер А.С. // Докл. БГУИР. 2011. № 6 (60). С. 68–73.
3. P. Berens // 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Nuremberg, Germany. 23–26 April 2012. P. 119–122.
4. M. Martorella // International Conference on Radar. Adelaide, SA. 2–5 Sept 2008. P. 38–43.
5. Гейстер С.Р., Пархоменко Н.Г., Гейстер А.С. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16, №1 2. С. 27–33.
6. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. М., 2006.