

УДК 621.396.96

## СПОСОБ И АЛГОРИТМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ КОЛЕСА АВТОМОБИЛЯ В КАРТИННОЙ ПЛОСКОСТИ ПРИ ОБРАЩЕННОМ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

А.С. ГЕЙСТЕР

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

Поступила в редакцию 29 апреля 2011

Впервые рассматривается способ радиолокационного сверхразрешения (раздельного наблюдения элементов) колеса, совершающего поступательно-вращательное движение, в картинной плоскости, проходящей вертикально по линии движения автотранспортного средства. Способ основан на обращенном синтезе апертуры антенны специального вида и обеспечивает получение информации о структуре и параметрах колесно-гусеничного тракта движущегося автотранспортного средства. Представляются результаты разработки алгоритма обработки принятого сигнала, обеспечивающего сверхразрешение, а также результаты исследования возможностей сверхразрешения колеса, полученные путем математического моделирования.

*Ключевые слова:* синтез апертуры антенны, сверхразрешение, колесо, автомобиль.

### Введение

Сверхразрешение колеса автомобиля может быть достигнуто путем обращенного синтеза апертуры антенны с использованием разработанной ранее [1, 2] математической модели радиолокационного сигнала, отраженного от колеса движущегося автомобиля. Радиолокационное изображение колеса, полученное в результате сверхразрешения, может быть использовано для оценки его параметров (радиус колеса  $R_{kol}$ , радиус обода  $R_{ob}$  и др.), которые, в свою очередь, могут быть применены для последующего определения класса автомобиля.

В простейшем случае раздельное наблюдение элементов колеса может быть достигнуто за счет использования физической антенны больших размеров, обеспечивающих малую ширину диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту и углу места [3]. В качестве примера рассмотрим линейное разрешение в азимутальной плоскости, которое определяется выражением  $\Delta_{\beta} = 2r_t \sin(\Delta\beta / 2)$ , где  $r_t$  – радиальная дальность до объекта,  $\Delta\beta \cong \lambda / L_a$ , [рад] – ширина ДНА по азимуту,  $\lambda$  – длина волны,  $L_a$  – эффективный размер апертуры антенны. В соответствии с этим выражением для обеспечения линейного разрешения  $\Delta_{\beta} = 0,1$  м на дальности  $r_t = 100$  м при длине волны  $\lambda = 0,03$  м требуется антенна с размером  $L_a \cong 30$  м. Очевидно, что использование антенн с такими размерами является крайне неудобным.

С другой стороны, требуемое разрешение может быть достигнуто при использовании обращенного синтеза апертуры антенны [4], при котором ширина диаграммы направленности [5]  $\Delta\beta \cong \lambda / 2L_{a\_syn}$ , [рад], где  $L_{a\_syn}$  – размер синтезированной апертуры, определяемый в простейшем случае как произведение скорости движения  $V_t$  автомобиля и времени синтеза апертуры антенны  $T_{syn}$ , то есть  $L_{a\_syn} \cong V_t T_{syn}$ . С учетом этого при скорости  $V_t = 60$  км/ч и длине

волны  $\lambda = 0,03\text{ м}$  разрешение  $\Delta_{\beta} = 0,1\text{ м}$  на дальности  $r_i = 100\text{ м}$  достигается при времени обращения синтеза апертуры  $T_{syn} \cong r_i \lambda / 2\Delta_{\beta} V = 0,9\text{ с}$ .

Таким образом, сверхразрешение движущегося автомобиля и элементов его колесного тракта наиболее просто может быть достигнуто при использовании обращенного синтеза апертуры антенны, что также предполагает и более дешевую практическую реализацию.

### Способ и алгоритм сверхразрешения колеса при обращенном синтезе апертуры антенны

Способ сверхразрешения основан на обращенном синтезе апертуры антенны, главной особенностью которого является многоканальная фокусировка синтезированной антенны в анализируемые точки на поверхности колеса, которые совершают поступательное и вращательное движения при перемещении автотранспортного средства. В основе предложенного способа сверхразрешения лежит закон изменения фазы произвольной точки на поверхности колеса. Рассмотрим произвольную точку с номером  $m$ , лежащую на  $n$ -ой окружности с радиусом  $R_n$ , что поясняется рис. 1, где  $R_{kol}$  – радиус колеса. Такую точку в общем случае можно обозначить как  $(n, m)$ -ую точку.

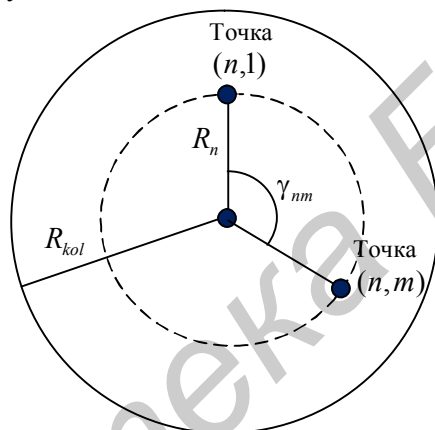


Рис. 1. Размещение произвольной  $(n, m)$ -ой точки на поверхности колеса

Закон изменения фазы сигнала от точки  $m$ , лежащей на  $n$ -ой окружности, определяется выражением:

$$\varphi_{nm}(t) = 2kr_{nm}(t), \quad (1)$$

где  $r_{nm}(t)$  – закон изменения радиальной дальности от фазового центра антенны радиолокатора до точки  $n_m$  колеса;  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число.

Закон изменения радиальной дальности до  $(n, m)$ -ой точки описывается выражением:

$$r_{nm}(t) = \sqrt{x_{nm}^2(t) + y_{nm}^2(t) + z_{nm}^2(t)}, \quad (2)$$

где  $x_{nm}(t)$ ,  $y_{nm}(t)$ ,  $z_{nm}(t)$  – законы изменения координат  $(n, m)$ -ой точки в системе координат, введенной в [1] при описании движения колеса относительно радиолокационного датчика. Эти законы описываются выражениями:

$$x_{nm}(t) = x_0 \pm V_t t + R_n \sin(\omega_{vr} t + \gamma_{nm}), y_{nm}(t) = y_0, z_{nm}(t) = (R_{kol} - R_n) + R_n [1 - \cos(\omega_{vr} t + \gamma_{nm})], \quad (3)$$

где  $x_0, y_0$  – начальные координаты центра колеса;  $\omega_{vr} = V_t / R_{kol}$  – угловая скорость вращения колеса;  $V_t$  – скорость автомобиля;  $\gamma_{nm}$  – угловое рассогласование между первой точкой  $n_1$  окружности и точкой  $n_m$  (рис. 1).

Далее рассмотрим алгоритм сверхразрешения, реализующий предложенный способ. В качестве ограничений разработки алгоритма отметим:

- постоянство скорости автомобиля  $V_t$ , предварительно измеряемой на этапе обнаружения. Это ограничение, как правило, выполняется на ограниченном интервале наблюдения;
- радиус колеса автомобиля  $R_{kol}$  полагается известным.

Так как предварительно размеры и структура колеса не известны, то априорная неопределенность устраняется использованием многоканальной обработки отраженного сигнала в диапазонах возможных изменений размеров расположения отражающих элементов колеса. Кроме того, необходимость многоканальной обработки продиктована также природой отраженного сигнала, представляющего собой совокупность сигналов известной формы от каждого отражателя колеса с индивидуальными законами изменения фазы и амплитуды.

Для описания алгоритма многоканальной обработки поверхность колеса (см. рис. 2) разбивается на  $N_R$  окружностей, отстоящих друг от друга на расстояние  $\Delta R$ . На каждой  $n$ -ой окружности располагается  $M_n$  точек фокусировки, которые показаны на рис. 2 черными точками, причем расстояния между соседними точками фокусировки на окружности равны  $\Delta L$ . В общем случае переменные  $\Delta R$  и  $\Delta L$  могут иметь произвольные значения, а их оптимизация основана на критерии «эффективность – сложность (стоимость)» и зависит от разрешающей способности в картинной плоскости. В рассматриваемом случае такая разрешающая способность определяется временем синтеза апертуры и параметрами перемещения автомобиля относительно датчика. Подходы к выбору оптимальных значений  $\Delta R$  и  $\Delta L$  в данной работе не рассматриваются.

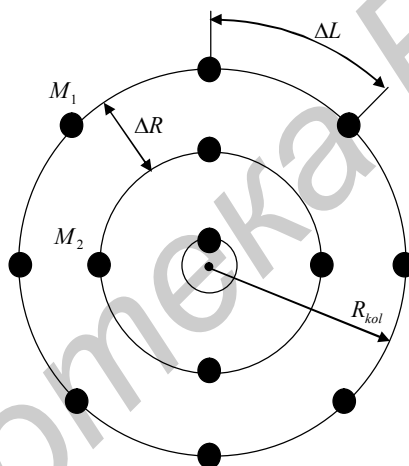


Рис. 2. Размещение точек фокусировки многоканального устройства сверхразрешения

Как отмечалось выше, устройство сверхразрешения является многоканальным, причем номера каналов целесообразно связать с номерами точек фокусировки на поверхности колеса. С учетом этого  $(n, m)$ -ый канал обработки сигнала, отраженного от  $(n, m)$ -ой точки, представляет собой устройство междупериодной обработки, выполняющее когерентное накопление сигнала, отраженного от  $(n, m)$ -ой точки на поверхности колеса, совершающей поступательно-вращательное движение в процессе перемещения автомобиля. Такое когерентное накопление основано на компенсации междупериодного набега фазы для соответствующего положения  $(n, m)$ -ой точки в каждом периоде зондирования.

В результате такого накопления на выходе  $(n, m)$ -го канала обработки формируется комплексная амплитуда  $\xi_{n,m}$ . Совокупность комплексных амплитуд  $\xi_{n,m}$ ,  $n = \overline{1, N_R}$ ,  $m = \overline{1, M_n}$  представляет собой радиолокационный портрет колеса автомобиля в картинной плоскости.

Количество окружностей многоканальной модели определяется из соотношения  $N_R = R_{kol} / \Delta R$ , а количество точек фокусировки на окружности радиуса  $R_n$  равняется  $M_n = 2\pi R_n / \Delta L$ .

С учетом этого алгоритм сверхразрешения, реализующий многоканальную обработку принятого сигнала, может быть представлен в следующем виде:

$$\xi_{n,m} = \xi(n, m) = \sum_{j=1}^J M_c(jT_d) \cdot K_{n,m}(jT_d), \quad n = \overline{1, N_R}, \quad m = \overline{1, M_n}, \quad (4)$$

где  $M_c(jT_d)$  –  $j$ -ый отсчет комплексной огибающей принятого сигнала;  
 $K_{n,m}(jT_d) = \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} r_{n,m}(jT_d)\right)$  –  $j$ -ый отсчет опорной функции  $(n, m)$ -го канала обработки;  
 $r_{n,m}(jT_d)$  –  $j$ -ый отсчет радиальной дальности от фазового центра физической антенны радиолокационного датчика до  $(n, m)$ -ой точки фокусировки на поверхности колеса автомобиля;  $T_d$  – период дискретизации принятого сигнала (при использовании периодического зондирующего сигнала – период повторения);  $J$  – количество обрабатываемых временных отсчетов;  $n = \overline{1, N_R}$  – номер окружности на поверхности колеса;  $m = \overline{1, M_n}$  – номер анализируемой точки на соответствующей  $n$ -ой окружности.

### Результаты исследования возможностей сверхразрешения колеса движущегося автомобиля на основе математического моделирования

Для оценки работоспособности разработанного алгоритма и оценки возможностей по сверхразрешению колеса было проведено математическое моделирование. Исходные данные для моделирования: начальные координаты центра колеса  $x_0 = 50$  м,  $y_0 = 25$  м; скорость автомобиля  $V_t = 20$  м/с; внешний  $R_{kol} = 0,3$  м и внутренний  $R_{ob} = 0,1$  м радиусы колеса, на которых располагаются неоднородности, вызывающие отражения; длина волны зондирующего сигнала  $\lambda = 0,03$  м; характеристики многоканального устройства, реализующего алгоритм сверхразрешения –  $T_d = 0,5$  мс,  $T_{syn} = 0,75$  с,  $\Delta R = 0,1$  м (число окружностей  $N_R = 3$ , а их радиусы  $R_1 = 0,3$  м,  $R_2 = 0,2$  м,  $R_3 = 0,1$  м),  $\Delta L = 0,02$  м (число точек фокусировки  $M_1 = 94$ ,  $M_2 = 63$ ,  $M_3 = 31$  на соответствующих окружностях).

В ходе моделирования рассмотрены три варианта расположения отражателей на колесе:  
 - семь отражателей расположены на окружности радиуса  $R_{kol}$ ;  
 - пять отражателей расположены на окружности радиуса  $R_{ob}$ ;  
 - восемь отражателей расположены на окружности радиуса  $R_{kol}$ , три – на окружности радиуса  $R_{ob}$ .

Для удобства рассмотрения результатов обработки «развернем» окружности, на которых располагаются точки фокусировки каналов обработки, в эквивалентные прямые линии (оси) таким образом, как это показано на рис. 3.

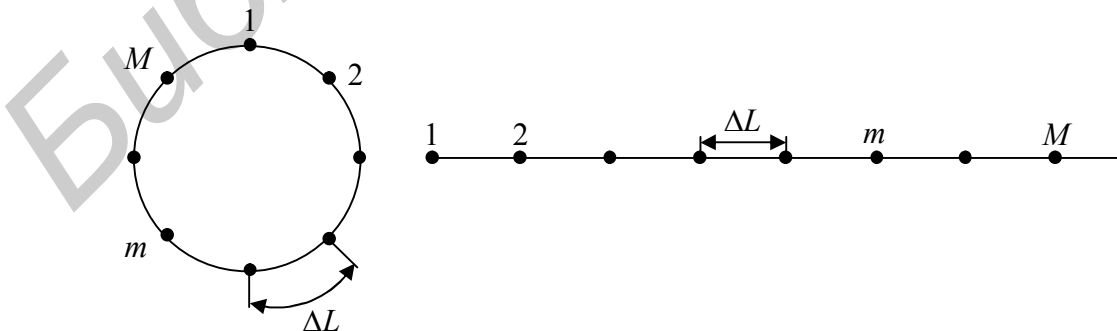


Рис. 3. Точки фокусировки, расположенные на окружности (слева) и на эквивалентной прямой линии (справа)

Результаты моделирования, представленные на рис. 4–6, для каждого варианта расположения отражателей на колесе характеризуются тремя графиками, на каждом из которых ото-

бражено распределение нормированных мощностей  $|\xi_{n,m}|^2 / |\xi|_{\max}^2$  выходных сигналов каналов фокусировки в точки с номерами  $m = \overline{1, M_n}$  на соответствующей  $n$ -ой окружности ( $n = \overline{1, 3}$ ) радиусом  $R_n$ .

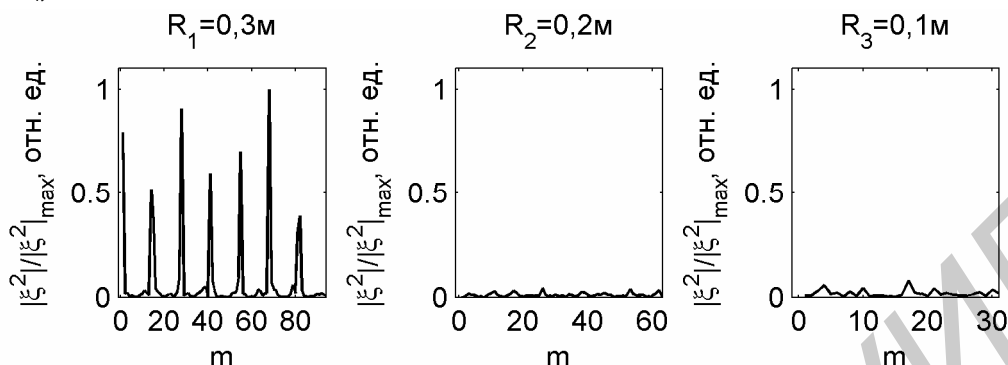


Рис. 4. Нормированные выходные сигналы каналов обработки при размещении отражателей по варианту 1

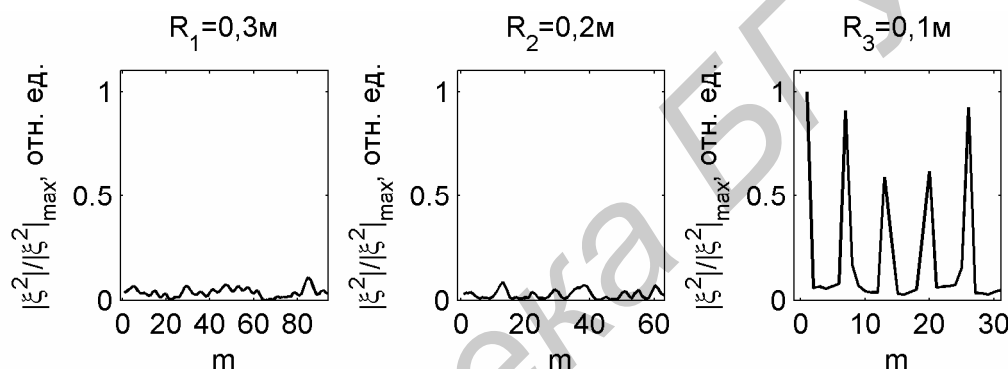


Рис. 5. Нормированные выходные сигналы каналов обработки при размещении отражателей по варианту 2

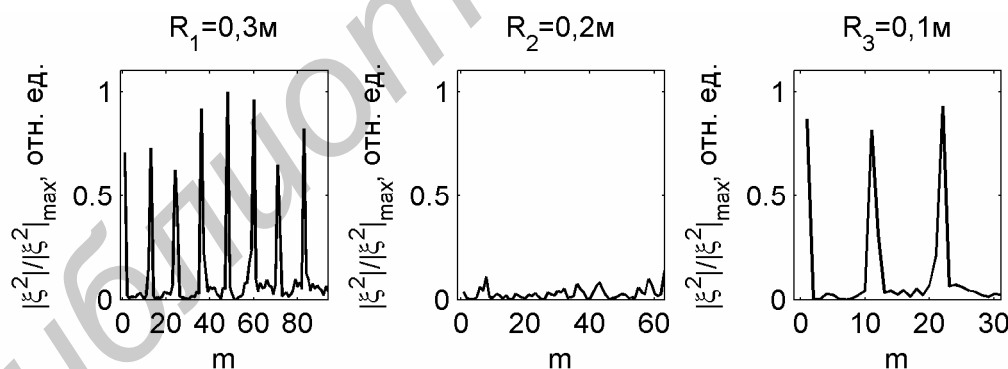


Рис. 6. – Нормированные выходные сигналы каналов обработки при размещении отражателей по варианту 3

Анализ результатов моделирования показывает следующее. Во-первых, на рисунках хорошо различимы радиолокационные изображения точечных отражателей, расположенных в соответствии с описанными выше вариантами моделирования. Количество пиков на графиках соответствует количеству заданных при моделировании отражателей. Во-вторых, расположение отражателей соответствует расположению точек фокусировки, для которых в соответствующих каналах обработки многоканального устройства получены наибольшие выходные сигналы. В-третьих, разработанный алгоритм сверхразрешения обеспечивает высокое качество фокусировки, на что указывают сравнительно малые (не выше значения 0,1) относительные уровни выходных сигналов каналов обработки, в точках фокусировки которых нет отражателей. В-четвертых, разработанный способ сверхразрешения позволяет получить детальное изображение объекта, выполняющего поступательно-вращательное движение, не только по ори-

зонталы, но и по вертикали, что является существенным отличием предлагаемого способа от традиционного способа обращенного синтеза апертуры антенны, исследованного ранее для сверхразрешения автомобилей [4].

### **Заключение**

Предложенный новый способ сверхразрешения объектов, выполняющих поступательно-вращательное движение, обеспечивает высококачественное разрешение, как по горизонтали, так и по вертикали, что позволяет получить радиолокационное изображение таких объектов в картинной плоскости. На основе математической модели сигнала, отраженного от колеса движущегося автотранспортного средства, разработан алгоритм сверхразрешения колеса, реализующий обращенный синтез апертуры антенны с фокусировкой в анализируемую точку на поверхности движущегося колеса. Данный алгоритм позволяет разработать устройство, обеспечивающее многоканальную фокусировку в точки на поверхности колеса, выполняющего поступательно-вращательное движение. На выходах каналов обработки этого устройства формируется радиолокационное изображение колеса в масштабе, однозначно соответствующем параметрам расстановки каналов обработки в картинной плоскости. Получаемое радиолокационное изображение колеса позволяет установить его размер, количество и расположение неоднородностей на его поверхности, а также отражательные способности этих неоднородностей.

## **CAR WHEEL RADAR SUPERRESOLUTION PROCESS AND ALGORITHM IN VERTICAL PLANE ON APPLICATION OF INVERSE SYNTHETIC APERTURE RADAR**

A.S. HEISTER

### **Abstract**

For the first time process of radar superresolution in a vertical plane of wheel making combined reciprocating and rotating motion is considered. The process is based on a special type of inverse synthetic aperture radar technique and provides information about structure and parameters of moving vehicle wheel or crawler. Results of a car wheel radar superresolution algorithm development are considered. Results of the algorithm facility research based on mathematical simulation are presented.

### **Литература**

1. *Гейстер А.С.* // Докл. БГУИР. 2011. №1 (55). С. 38–42.
2. *Гейстер А.С.* // Актуальные проблемы современности. 2010. №12 (62). С. 94–99.
3. *Марков Л.Н.* Антенные системы радиоэлектронной техники. М., 1993.
4. *Гейстер С.Р., Виноградов А.Е., Жарылганов Е.К.* // Наука и военная безопасность. 2009. №4 (24). С. 11–16.
5. *Антипов В.Н., Горяинов В.Т.* Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М., 1988.