

УДК 621.396.96

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ КОЛЕСА ДВИЖУЩЕГОСЯ АВТОМОБИЛЯ

А.С. ГЕЙСТЕР

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

Поступила в редакцию 26 октября 2010

Впервые рассматривается математическая модель, описывающая радиолокационный сигнал, отраженный от системы неоднородностей колеса движущегося автомобиля. Данная модель рассматривается в приложении к обращенному синтезу апертуры антенны, который позволяет получать радиолокационные изображения объектов, перемещающихся относительно радиолокатора. Рассматриваются основные характеристики радиолокационного сигнала, отраженного от колеса движущегося автомобиля, полученные путем моделирования.

*Ключевые слова:* синтез апертуры антенны, автомобиль, эффект Доплера.

### Введение

Синтез апертуры антенны (САА) обеспечивает сверхразрешение (раздельное наблюдение элементов) объекта за счет специальной когерентной обработки сигналов, принятых в процессе взаимного перемещения радиолокатора [1–3] и объекта наблюдения [4]. В последнее десятилетие проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования по сверхразрешению движущихся автомобилей путем обращенного синтеза апертуры антенны в неподвижном радиолокационном датчике. Эти исследования выполнены в приложении к задачам всепогодного автоматического контроля дорожного движения для анализа состава проходящих автомобилей и повышения достоверности выделения нарушителя в потоке путем определения длин автомобилей одновременно с измерением их скоростей. Исследования обеспечивают получение так называемых азимутальных радиолокационных портретов автомобилей [4], представляющих собой совокупность комплексных амплитуд, относящихся к различным элементам разрешения по азимуту и характеризующих распределение отражательной способности автомобиля в азимутальной плоскости вдоль линии его перемещения. В то же время у автомобиля имеется колесная ходовая часть, которая не учитывается в ходе обращенного синтеза апертуры антенны, но может обеспечить получение дополнительной информации о наблюдаемом движущемся объекте.

### Представление колеса в виде набора отражателей

Для упрощения восприятия модели отраженного сигнала (ОС) представим колесо в виде набора регулярных отражателей, угловой период расположения которых одинаков. На рис. 1 представлен пример реального колеса автомобиля и его простейшие эквивалентные радиолокационные модели в виде набора  $N_{отр}$  отражателей, расположенных или по радиусу колеса  $R_k$  (см. рис. 1,б), или по меньшему радиусу  $R_d$  (см. рис. 1,в). Заметим, что отражатели, представленные на рис. 1,б, являются неоднородностями на протекторе шины, а отражатели, представленные на рис. 1,в – на диске колеса. Уровни сигналов, отраженных неоднородностями, определяются соотношениями длины волны  $\lambda_0$  зондирующего сигнала (ЗС) и размерами неодно-

родностей на шине и диске. С учетом этого оба отмеченных варианта эквивалентной радиолокационной модели требуют рассмотрения. Полагаем число отражателей в моделях одинаковым, а угловое смещение  $n$ -го отражателя относительно первого отражателя обозначим как  $\gamma_n = \frac{2\pi}{N_{отр}}(n-1)$ . В центре каждой модели расположим отражатель с номером  $n=0$ , который

выполняет только поступательное движение со скоростью  $V_t$ , соответствующей скорости движения автомобиля.

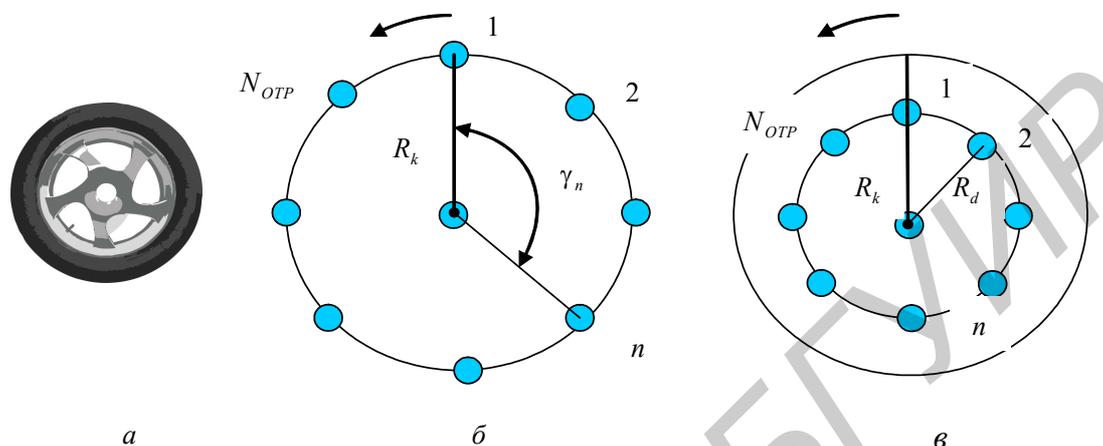


Рис. 1. Колесо автомобиля и его эквивалентные радиолокационные модели ( $a$  – вид колеса;  $b$  – эквивалентная модель с размещением отражателей по радиусу колеса;  $c$  – эквивалентная модель с размещением отражателей по радиусу диска колеса)

### Модель временной структуры радиолокационного сигнала, отраженного от колеса автомобиля

Сигнал, отраженный от колеса автомобиля, представим совокупностью сигналов известной формы, сформированных  $N_{отр}$  отражателями. Эти сигналы имеют индивидуальные законы изменения фаз и амплитуд. С учетом этого при монохроматическом ЗС отраженный сигнал на выходе приемной антенны описывается выражением:

$$U_c(t) = \sum_{n=0}^{N_{отр}} E_n(t) \exp[i(\omega_0 t + \phi_n(t))], \quad (1)$$

где  $E_n(t)$  – амплитуда сигнала, отраженного от  $n$ -го отражателя, в точке приема;  $\phi_n(t)$  – закон изменения фазы сигнала от  $n$ -го отражателя в процессе его перемещения относительно фазового центра антенны радиолокатора;  $\omega_0$  – частота зондирующего сигнала радиолокатора.

Используя понятие комплексной огибающей [5], ОС можно представить в виде:

$$U_c(t) = \sum_{n=1}^{N_{отр}} M_n(t) \exp(i\omega_0 t), \quad (2)$$

где  $M_n(t) = E_n(t) \exp(i\phi_n(t))$  – комплексная огибающая ОС.

Закон изменения фазы сигнала от  $n$ -го элемента в общем случае определяется выражением

$$\phi_n(t) = 2kr_n(t), \quad (3)$$

где  $r_n(t)$  – закон изменения радиальной дальности от фазового центра антенны радиолокатора до  $n$ -го отражающего элемента;  $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  – волновое число.

Найдем выражение, описывающее расстояние  $r_n(t)$  от  $n$ -го отражателя до фазового центра антенны.

Вначале рассмотрим эквивалентную модель, в которой отражатели расположены на поверхности шины. На рис. 2 представлено движения колеса в декартовой системе координат, центр которой для упрощения размещен в фазовом центре физической антенны. Центр колеса, находящийся на высоте  $R_k$ , перемещается вдоль оси  $X$  линейно со скоростью  $V_t$ .

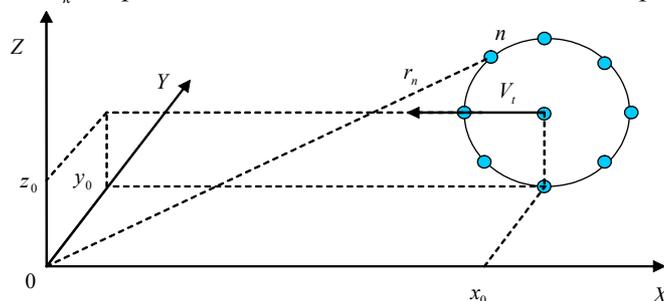


Рис. 2. Геометрическое представление движения колеса относительно фазового центра физической антенны

Сделаем следующие допущения: колесо движется равномерно и прямолинейно по плоской поверхности; ширина колеса принимается близкой к нулю и исключается из рассмотрения; высота фазового центра физической антенны равна нулю.

С учетом этих допущений выражения, описывающие проекции изменения радиальной дальности на координатные оси, имеют вид:

$$x_n(t) = x_0 + V_t t + R_k \sin(\omega_{vr} t + \gamma_n), \quad y_n(t) = y_0, \quad z_n(t) = R_k [1 - \cos(\omega_{vr} t + \gamma_n)], \quad (4)$$

где  $\omega_{vr} = 2\pi \frac{V_t}{L_k}$  – угловая скорость вращения колеса, которая преобразуется к виду  $\omega_{vr} = \frac{V_t}{R_k}$  с учетом того, что длина окружности колеса  $L_k = 2\pi R_k$ . При этом скорость объекта  $V_t$  имеет знак «-» при приближении объекта к радиолокатору и знак «+» – при удалении.

Исходя из (4) радиальная дальность до  $n$ -го отражателя описывается выражением:

$$r_n(t) = \sqrt{x_n^2(t) + y_n^2(t) + z_n^2(t)}, \quad n = \overline{1, N_{отр}}. \quad (5)$$

Выражение, описывающее расстояние от отражателя до фазового центра антенны для эквивалентной модели, в которой отражатели расположены на диске радиусом  $R_d$ , аналогично выражению (5), в которое подставляются проекции  $x_n(t)$ ,  $y_n(t)$  и  $z_n(t)$  в виде:

$$x_n(t) = x_0 + V_t t + R_d \sin(\omega_{vr} t + \gamma_n), \quad y_n(t) = y_0, \quad z_n(t) = (R_k - R_d) + R_d [1 - \cos(\omega_{vr} t + \gamma_n)]. \quad (6)$$

### Результаты моделирования сигнала, отраженного от колеса автомобиля

Моделирование проведено для следующих общих условий: длина волны ЗС  $\lambda_0 = 0,03$  м, расстояние  $y_0 = 20$  м, скорость  $V_t = 20$  м/с (объект приближается к радиолокатору), радиус колеса  $R_k = 0,25$  м,  $R_d = 0,12$  м, частота дискретизации принятого сигнала  $F_d = 20$  кГц, число анализируемых отсчетов принятого сигнала – 2048.

Также полагалось следующее: во-первых, отражатели во всех рассматриваемых моделях являются изотропными с одинаковыми значениями эффективной отражающей поверхности, что обуславливает отсутствие случайных флуктуаций; во-вторых, учитывая малые размеры колеса относительно расстояния  $y_0 = 20$  м, при моделировании пренебрегалось изменением мощности отраженного сигнала в зависимости от радиального расстояния. С учетом этого амплитуды всех принятых сигналов определены как  $E_n(t) = 1, n = \overline{0, N_{отр}}$ .

На рис. 3 представлены примеры законов изменения фаз для двух отражателей с номерами  $n=1$  и  $n=3$  в системе из  $N_{\text{отд}}=5$ , расположенных на поверхности шины. Начальное положение центра колеса  $x_0 = 50$  м.

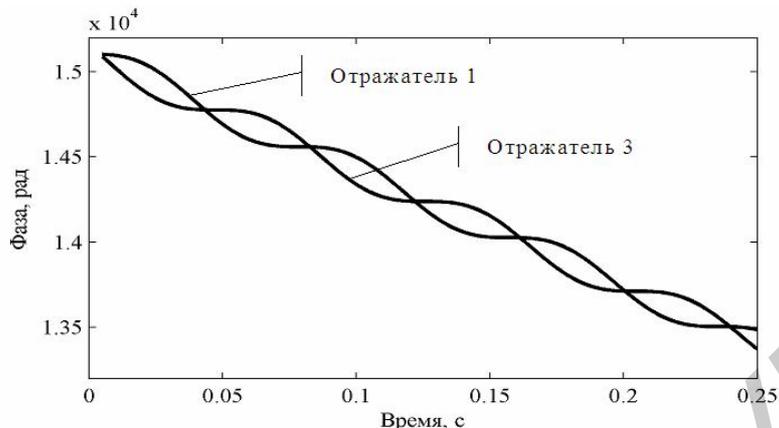


Рис. 3. Законы изменения фаз для различных отражателей

Из рисунка видно, что фазы сигналов, отраженных от различных отражателей, изменяются по одинаковым законам, но смещены друг относительно друга во времени. Следовательно, имеется физическая основа для разделения сигналов от различных отражателей.

На рис. 4 и 5 представлены нормированные энергетические спектры сигналов, отраженных от системы из 5-ти отражателей, расположенных на шине (рис. 4) и по диску (рис. 5). Центр систем имел начальную координату  $x_0 = 100$  м.

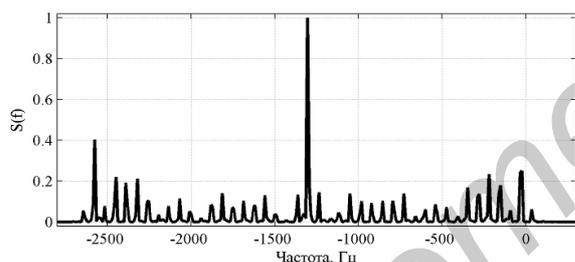


Рис. 4. Спектр сигнала от системы отражателей, расположенных по шине

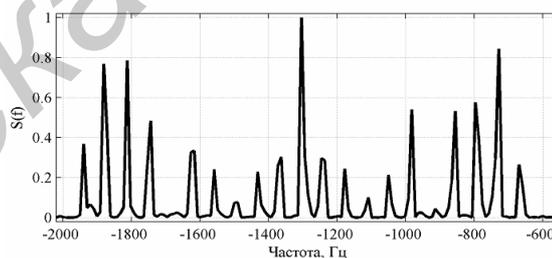


Рис. 5. Спектр сигнала от системы отражателей, расположенных по диску

Анализируя спектры сигналов, отраженных от колеса как системы отражателей, установлено, что структура спектра отраженного сигнала определяется числом отражателей и скоростью движения, а ширина спектра – расположением отражателей относительно поверхности шины. При расположении отражателей по поверхности шины спектр имеет максимальную ширину, в два раза превышающую значение доплеровской частоты, которое соответствует центру спектра. По мере перемещения отражателей от поверхности шины к центру системы происходит уменьшение ширины спектра пропорционально отношению радиуса расположения отражателей к радиусу колеса.

На рис. 6 и 7 представлены нормированный энергетический спектр и автокорреляционная функция сигнала, отраженного от системы из 5-ти отражателей, расположенных по диску. Центр систем имел начальную координату  $x_0 = 2,5$  м, т.е. находился вблизи линии базы, имеющей координату  $x = 0$ . По мере приближения системы отражателей к линии базы происходит как размывание спектра отраженного сигнала, так и нарушение периодичности следования пиков автокорреляционной функции, что обусловлено ростом нелинейности изменений фаз отраженных сигналов в ходе интервала спектрального анализа.

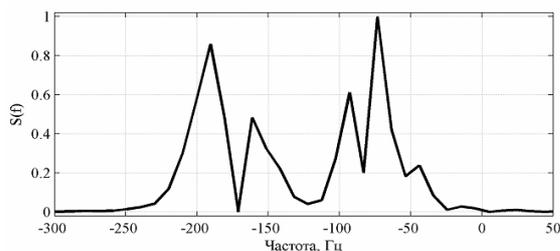


Рис. 6. Спектр сигнала от системы отражателей, расположенных по диску

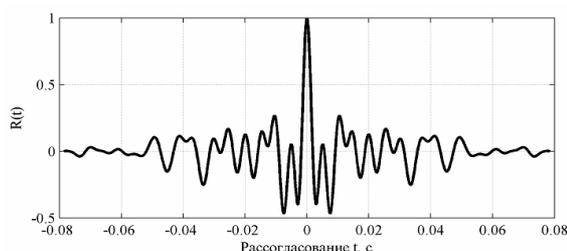


Рис. 7. Автокорреляционная функция сигнала от системы отражателей, расположенных по диску

### Заключение

Данная работа направлена на получение дополнительной информации о конструкции движущегося автомобиля. Информация может быть получена из сигнала, отраженного от элементов ходовой части автомобиля и, в частности, колес. Результаты моделирования колеса как системы отражателей позволяют полагать, что сигналы, сформированные различными отражателями, могут быть разделены путем специального анализа. Суть такого анализа заключается в компенсации набегов фаз и когерентном накоплении сигналов для соответствующих отражателей, что в итоге позволит сформировать радиолокационное изображение колеса.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE RADAR SIGNAL REFLECTED FROM A MOVING CAR WHEEL

A.S. HEISTER

### Abstract

For the first time mathematical model describing a radar signal reflected from the system of obstacles of moving car wheel is considered. The model in application to inverse antenna aperture synthesis algorithm that makes it possible to get radiolocating portraits of moving objects is reviewed. The main specifications of radiolocating signal reflected from moving car wheel are modeled and analyzed.

### Литература

1. Антипов В.Н., Горяинов В.Т. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М., 1988.
2. Канащенков А.И. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли. М., 2006.
3. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М., 2005.
4. Гейстер С.Р., Виноградов А.Е., Жарылганов Е.К. // Наука и военная безопасность. 2009. №4 (24). С.11–16.
5. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. М., 1983.