

# Показатель качества формирования виртуальных объектов для радаров высокого разрешения

И. О. Колачев

БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

kolachev\_io@voenmeh.ru

**Аннотация.** Активные ретрансляторы (транспондеры) являются перспективными средствами калибровки радаров высокого разрешения. Они способны формировать виртуальные объекты на радиолокационном изображении и управлять их местоположением электронным путём. Поскольку по мере смещения виртуального объекта относительно реального местоположения ретранслятора его изображение становится расфокусированным, необходимо ввести количественный показатель качества формирования этого объекта. В статье предлагается использовать в качестве этой величины площадь сечения изображения виртуального объекта, и на основании её сравнивать между собой методы формирования виртуальных объектов, а также их пригодность для решения задач калибровки.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение; радар; калибровка; виртуальный объект; транспондер; активный ретранслятор

## I. ВВЕДЕНИЕ

В силу стремительного развития радаров высокого разрешения, высококачественные радиолокационные изображения (РЛИ) используются для решения большого числа прикладных задач [1]. Важно отметить, что для решения большинства из них требуются количественные значения характеристик рассеяния объектов радиолокационной сцены. С целью сопоставления значений пикселей РЛИ и реальных значений исследуемых характеристик необходимо осуществить калибровку радара. Этот процесс заключается в нахождении на РЛИ калибровочного эталона и сравнении значений пикселей изображения с известным значением характеристики эталона. Калибровочный эталон должен иметь априорно известные и высокостабильные местоположение и характеристики рассеяния. В качестве подобных объектов на практике обычно используют уголковые отражатели. Они обладают простой конструкцией, но, как правило, большими размерами, затрудняющими их оперативное перемещение в пространстве. В связи с этим, в настоящее время на практике часто используют активные ретрансляторы сигнала (транспондеры), которые формируют на РЛИ точечную отметку и управляют её интенсивностью и местоположением электронным путём без перемещения ретранслятора [2]. Для подобных отметок часто нет реального объекта радиолокационной сцены, поэтому их принято называть виртуальными, следовательно, транспондер фактически осуществляет имитацию сигнала точечного объекта. Важно отметить, что подобная имитация часто осуществляется с ошибками, приводящими к расфокусировке РЛИ виртуального объекта. Особенно заметно это явление проявляется на смещенных

виртуальных объектах: они зачастую имеют не точечный характер, а групповой или распределённый. Подобные объекты уже трудно использовать для задач калибровки. Важно отметить, что оценка характера виртуального объекта зачастую носит качественный характер: объект либо точечный, либо групповой. Подобная оценка интуитивно понятна, однако её сложно использовать при сравнении методов формирования виртуальных объектов между собой из-за бинарности оценки, а также при определении границы допустимого смещения объекта относительно транспондера из-за субъективности определения характера объекта. Исходя из этого, необходимо выбрать количественный показатель качества формирования виртуального объекта, на основании которого можно сравнивать методы их создания, а также пригодность этих объектов для решения задач калибровки.

## II. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Разнесённые в пространстве объекты радиолокационной сцены определяются значением характеристики рассеяния, а также фазовой структурой отражённого сигнала. Для радаров высокого разрешения первая величина определяет яркость отметки на РЛИ, а вторая – её координаты. Задача транспондера заключается в том, чтобы с помощью усилителей задать требуемую яркость виртуального объекта на РЛИ и преобразовать его фазовую структуру для его смещения. Второй процесс можно осуществить с помощью задержки сигнала во времени и смещения его спектра по оси частоты. С учётом того, что один ретранслятор может одновременно формировать несколько виртуальных объектов, эти процессы упрощённо можно описать с помощью следующего выражения:

$$S_T(t) = \sum_i K_T S_R(t - \Delta t_i) e^{-j2\pi\Delta F_i t},$$

где  $S_T(t)$  – сигнал на выходе транспондера;  $K_T$  – коэффициент усиления транспондера;  $S_R(t)$  – сигнал на входе транспондера;  $\Delta t_i$  – задержка сигнала;  $\Delta F_i$  – смещение спектра сигнала по оси частоты.

Задержка ретранслируемого сигнала приводит к смещению виртуального объекта по оси наклонной дальности (по нормали к траектории движения носителя радара), а по оси частот – по азимуту (вдоль траектории). Способ оценки требуемых величин задержки во времени и смещения по частоте определяется методом формирования виртуального объекта. В наиболее простом случае эти величины задаются только необходимыми координатами и не зависят от времени.

На рис. 1 показан пример РЛИ набора групповых виртуальных объектов, полученного с помощью

математической модели [3]. На рисунке видно, что вблизи реального местоположения транспондера (показан белой стрелкой) виртуальные объекты являются точечными и с их помощью можно имитировать групповой объект. По мере смещения виртуальных объектов от ретранслятора их изображения становятся расфокусированными и вместо группового объекта наблюдается распределённый. Важно отметить, что границу, при которой объект остаётся групповым, достаточно трудно оценить, используя только данные на РЛИ. Именно поэтому необходимо ввести некоторый количественный показатель и принимать решение на основании его значения. Поскольку групповой виртуальный объект формируется из набора точечных, этот показатель должен характеризовать степень приближенности виртуального объекта к точечному.

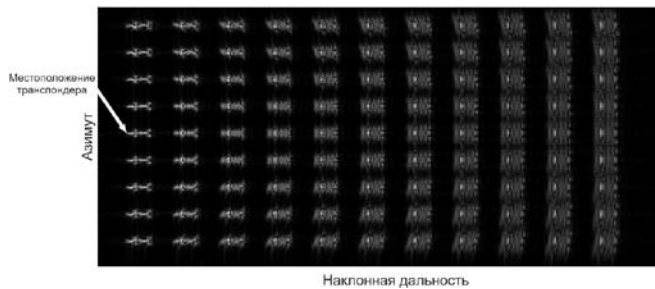


Рис. 1. Пример РЛИ с набором групповых виртуальных объектов

### III. ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

#### A. Выбор показателя

Расфокусировка виртуального объекта проявляется в расширении центральных лепестков в сечении РЛИ по наклонной дальности и азимуту. В первую очередь это вызвано несоответствием коэффициентов опорных функций, используемых при сжатии, и параметров сигнала виртуального объекта. Подобное несоответствие обусловлено ошибками преобразования фазового распределения отражённого сигнала от ретранслятора к распределению смещённого объекта. Поэтому в качестве величины, определяющей точность виртуального объекта, можно использовать разрешающие способности виртуальных объектов по азимуту  $\delta x$  и наклонной дальности  $\delta r$ , либо их отношения к разрешающей способности радара. На рис. 3 слева и по центру приведена зависимости этих величин от величины

смещения объектов в виде изолиний, полученных с помощью компьютерного моделирования [3].

Из рисунка видно, что использование только разрешения по дальности или азимуту не позволяет решить поставленную задачу. Обусловлено это тем, что разрешающая способность по дальности не зависит от задержки сигнала. Более того, у этой величины есть диапазон смещений по азимуту, в пределах которого разрешение по дальности практически не изменяется. Разрешение по азимуту также не подходит из-за того, что есть некоторое направление, вдоль которого оно практически не ухудшается. Эти эффекты вызваны тем, что при смещении виртуального объекта одновременно по азимуту и дальности его РЛИ может поворачиваться. В этом случае его сечения, определяющие разрешающие способности, могут практически не увеличиться, однако энергия сигнала всё равно распределяется между несколькими пикселями РЛИ, как показано на рис. 2.

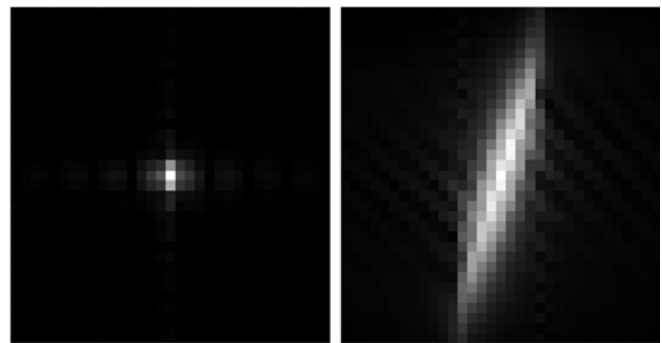


Рис. 2. Примеры РЛИ реального точечного объекта (слева) и расфокусированного виртуального (справа)

Исходя из этого, для оценки точности виртуального объекта следует ввести показатель, характеризующий его изображение целиком. Подобной величиной является площадь сечения виртуального объекта на некотором уровне (рис. 3 справа). Этот показатель не имеет аналогов среди тактико-технических характеристик радаров высокого разрешения, однако именно она характеризует распределение энергии сигнала между пикселями РЛИ. Следовательно, для определения точности виртуального объекта достаточно подсчитать, сколько пикселей на РЛИ ему соответствует, и сравнить с аналогичной величиной для реального объекта.

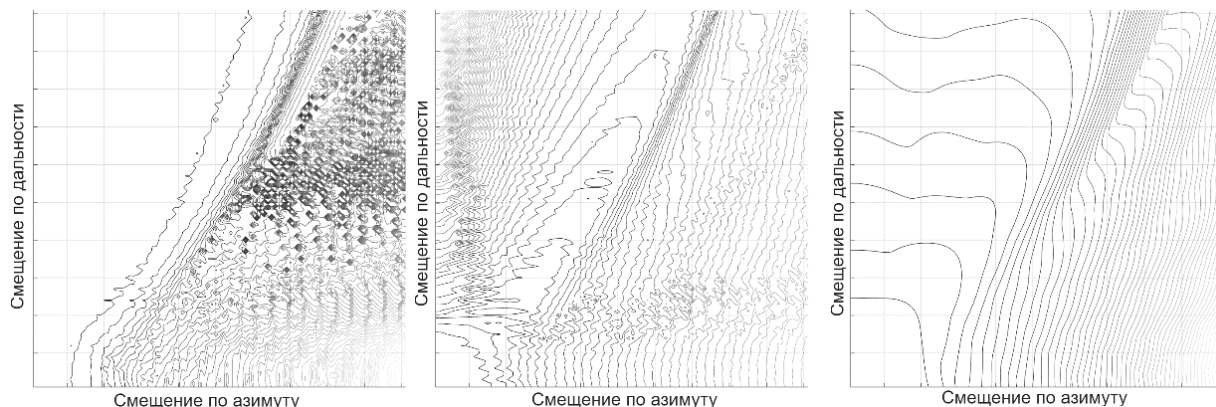


Рис. 3. Зависимость разрешающей способности виртуальных объектов по наклонной дальности (слева), азимуту (по центру) и площади сечения (справа) в зависимости от смещения относительно транспондера

### В. Метод определения площади сечения изображения виртуального объекта

Рассмотрим метод определения площади сечения изображения виртуального объекта. Будем считать, что при её определении используется компьютерное моделирование, а не реальный эксперимент. Вызвано это тем, что при моделировании можно не учитывать спекл-шум, который всегда имеет место на реальных РЛИ. Подобное обстоятельство существенно, поскольку предлагаемый метод основан на подсчёте пикселей изображения, соответствующих виртуальному объекту, а наличие спекл-шума может привести к появлению ошибочных пикселей и исказить определяемый показатель. Также при моделировании можно не учитывать направленность антенны, поскольку она изменяет мощность принимаемого сигнала, что также может привести к ошибкам.

Помимо этого, необходимо ввести ещё одно ограничение: используемый режим обзора радара. Метод предполагает, что фазовое распределение отражённого сигнала, на основе которого формируется РЛИ, можно считать двухмерным узкополосным сигналом. Это характерно для маршрутного обзора, при котором антенна неподвижна. Как показывает практика, достижимое разрешение по азимуту в этом случае определяется размерами антенны и составляет единицы метров. Для радаров с более высоким разрешением используются другие типы обзоров и предложенный метод применять нельзя. Помимо этого, для синтеза РЛИ следует использовать алгоритмы, основанные на линейной фильтрации.

С учётом этих ограничений, рассмотрим процесс определения искомой величины, основные этапы которого показаны на рис. 4. Сначала на комплексном РЛИ выделяется фрагмент, включающий в себя пиксели, соответствующие виртуальному объекту. Затем этот фрагмент интерполируется с помощью ряда Котельникова, поскольку комплексное РЛИ и исходное фазовое распределение можно считать узкополосными сигналами. Эта операция необходима для повышения точности оценки площади сечения. После этого подсчитывается количество пикселей

интерполированного изображения, значения которых относительно максимума превышают уровень  $-3\text{дБ}$ . Для определения площади сечения полученное значение необходимо умножить на размер пикселя интерполированного изображения. Этот размер определяется траекторией движения носителя радара, и для прямолинейного равномерного случая итоговое выражение имеет следующий вид:

$$S(\Delta R, \Delta X) = N(\Delta R, \Delta X)VT \frac{c}{2f_0} \frac{AB}{A'B'}, \quad (1)$$

где  $N(\Delta R, \Delta X)$  – количество пикселей интерполированного изображения виртуального объекта, относительный уровень которых превышает  $-3\text{дБ}$ ;  $V$  – скорость движения носителя радара;  $T$  – период следования зондирующих импульсов радара;  $f_0$  – частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя радара;  $A$  и  $A'$  – количество пикселей исходного и интерполированного фрагмента РЛИ по наклонной дальности, а  $B$  и  $B'$  – по азимуту.

Полученное значение следует сравнить с площадью сечения реального точечного объекта, расположенного по тем же координатам, либо с площадью виртуального, не смещённого относительно транспондера:

$$K(\Delta R, \Delta X) = \frac{S_e(\Delta R, \Delta X)}{S_p(\Delta R, \Delta X)} \approx \frac{S_e(\Delta R, \Delta X)}{S_e(0, 0)},$$

где  $S_e$  и  $S_p$  – значения выражения (1), полученные, соответственно, для виртуального и реального объектов.

Если значение отношения близко к 1, то виртуальный объект можно считать точечным и подходящим для решения поставленной задачи. Если определить допустимое значение  $K$ , то можно оценить допустимую зону смещения виртуального объекта, при котором его можно считать пригодным. Помимо этого, сравнивая значения  $K$  или  $S$ , можно сравнить между собой методы формирования виртуальных объектов. Чем меньше значение  $S$ , и чем ближе значение  $K$  к 1, тем ближе фазовая структура ретранслируемого сигнала транспондера к требуемой, и тем лучше используемый метод.

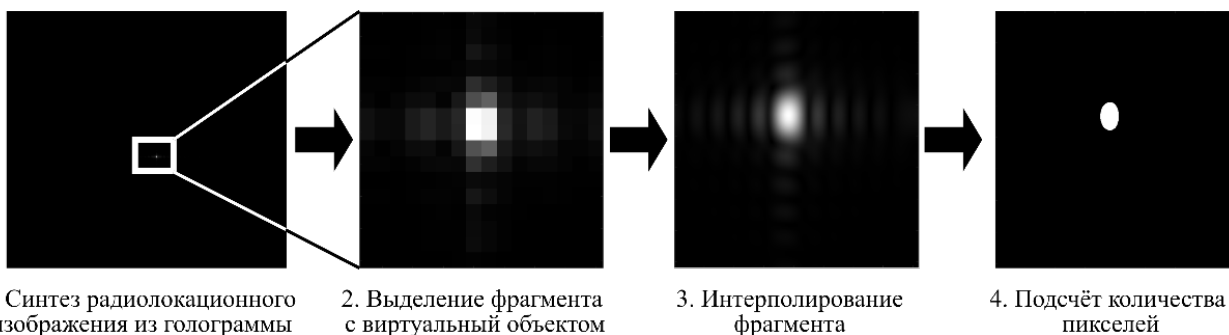


Рис. 4. Этапы определения площади сечения виртуального объекта

### С. Проверка адекватности показателя

С целью проверки адекватности предположенного показателя было осуществлено компьютерное моделирование. С помощью математической модели [3] радара высокого разрешения, движущегося по прямолинейной траектории, и работающего в маршрутном режиме обзора, были сформированы радиолокационные голограммы виртуальных объектов с

различными смещениями относительно ретранслятора. Затем с помощью алгоритмов дальность-Доплер (RDA) [4] и частотного масштабирования (CSA) [5] были синтезированы РЛИ. После этого с помощью предложенного ранее метода были оценены значения площадей виртуальных объектов. Результаты приведены в табл. 1 и 2. На рис. 5 показаны примеры РЛИ виртуальных объектов для различных значений  $K$ .

ТАБЛИЦА I. Значения площадей сечений виртуальных объектов при использовании RDA для синтеза РЛИ

Смещение по дальности	Смещение по азимуту				
	0	$\Delta X_0$	$2\Delta X_0$	$3\Delta X_0$	$4\Delta X_0$
0	0,0920	0,1186	0,3438	0,9549	1,8285
$\Delta R_0$	0,0971	0,1369	0,3753	0,9272	1,7012
$2\Delta R_0$	0,1926	0,2384	0,3590	0,7519	1,5553
$3\Delta R_0$	0,3425	0,3938	0,3892	0,5819	1,3745
$4\Delta R_0$	0,5244	0,5267	0,5175	0,5781	0,9974

ТАБЛИЦА II. Значения площадей сечений виртуальных объектов при использовании CSA для синтеза РЛИ

Смещение по дальности	Смещение по азимуту				
	0	$\Delta X_0$	$2\Delta X_0$	$3\Delta X_0$	$4\Delta X_0$
0	0,0932	0,1219	0,3494	0,9541	1,7899
$\Delta R_0$	0,1222	0,1636	0,2828	0,8896	1,6700
$2\Delta R_0$	0,3226	0,3153	0,3453	0,5848	1,6191
$3\Delta R_0$	0,4846	0,4947	0,4913	0,5501	1,3767
$4\Delta R_0$	0,5461	0,6027	0,6544	0,6851	0,9091

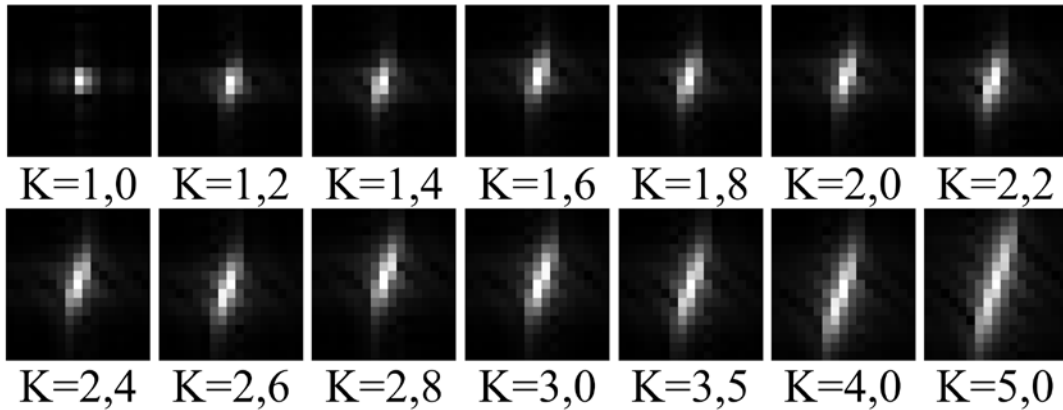


Рис. 5. Примеры РЛИ виртуальных объектов с различными значениями  $K$

Из таблиц видно, что по мере смещения виртуального объекта относительно реального местоположения транспондера, площадь сечения его изображения увеличивается. Особенно заметен рост этого показателя при смещении по азимуту, но скорость роста уменьшается при увеличении смещения по дальности. Также из таблиц видно, что на значение площади влияет выбранный алгоритм синтеза РЛИ. Обусловлено это в первую очередь различием в способах коррекции миграции траекторного сигнала по дальности. RDA предполагает, что закон миграции одинаковый в пределах всего РЛИ. Выбирается некоторая опорная дальность, и коррекция осуществляется в соответствии с ней. В CSA это не так, и одним из этапов этого алгоритма является коррекция законов миграции дальности так, чтобы они стали инвариантными к наклонной дальности. При осуществлении задержки ретранслируемого сигнала в транспондере на постоянное значение, закон миграции определяется координатами транспондера, дальность до которого является опорной при использовании RDA в модели. В CSA коррекция осуществляется ошибочно, поскольку закон миграции виртуального объекта не совпадает с ожидаемым на его наклонной дальности.

Из рис. 5 видно, что предложенный показатель позволяет определить даже малую степень расфокусировки РЛИ виртуального объекта и даёт ей количественную оценку. Важно отметить, что выбор допустимого значения  $K$  зависит поставленной задачей перед радаром высокого разрешения. Обоснование допустимого значения  $K$  является темой дальнейших исследований. На данный момент эту величину можно использовать для сравнения методов формирования виртуальных объектов.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам исследования на основании результатов компьютерного моделирования было установлено, что пригодность виртуального объекта для решения практических задач, например калибровки, определяется тем, насколько его характер близок к точечному. Для того, чтобы определить количественно степень его близости, следует использовать площадь сечения его РЛИ, поскольку эта величина характеризует объект целиком. Отношение площади РЛИ виртуального объекта к аналогичной величине реального точечного объекта характеризует степень расфокусировки. Если задать приемлемую степень расфокусировки, то можно определить границы зоны допустимого выноса виртуального объекта, при котором он остаётся пригодным для решения практической задачи. Помимо этого, выбранный показатель можно использовать для сравнения существующих методов формирования виртуальных объектов, а также разработки новых методов, что и будет сделано в ходе дальнейших исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] SAR data applications in earth observation: An overview / A. Tsokas, M. Rysz, P.M. Pardalos, K. Dipple // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 205. P. 117342.
- [2] Евсеев В.И. Вопросы обеспечения калибровки радиолокационных станций в системах дистанционного зондирования Земли / В.И. Евсеев, К.И. Титов, И.О. Колачев // Информация и Космос. 2023. № 4. С. 12-24.
- [3] Евсеев В.И. Модель транспондера для калибровки радара в информационно-измерительной и управляющей системе дистанционного зондирования Земли / В.И. Евсеев, И.О. Колачев // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 12. С. 135-146.
- [4] Школьный Л.А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 531 с.
- [5] Precision SAR processing using chirp scaling / R.K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I.G. Cumming, F.H. Wong // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32. № 4. P. 786-799.