

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭХОСИГНАЛОВ ДЛЯ РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ НА ОСНОВЕ ВХОДНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрен механизм генерации эхосигналов для радара с синтезированной апертурой (РСА) на основе входного изображения. Данные, сгенерированные имитатором, предназначены для упрощения разработки и тестирования обработочной модули РСА. Представлена математическая модель получения данных, соответствующих реальным эхосигналам.

Ключевые слова и словосочетание: Радар, радар с синтезированной апертурой, радиолокация, имитация, имитатор, эхосигнал, изображение.

Радары с синтезированной апертурой (РСА) излучают зондирующие сигналы в импульсном режиме и осуществляют обзор поверхности за счет перемещения носителя радара. Разработка и тестирование таких систем довольно дорогая, поскольку это связано с реальными полетами. Исходя из последнего, при создании РСА находят широкое применение имитаторы эхосигналов, с помощью которых получают эхосигналы, соответствующие реальным [1, 2]. Используя имитатор, разрабатывается модуль обработки (МО) РСА, начальные этапы его тестирования. МО – это аппаратно-программный комплекс, который, обрабатывая эхосигналы, формирует изображение местности.

При соответствующих модификациях имитаторы могут использоваться как системы радиоэлектронного подавления (РЭП) РСА, целью которых является введение в заблуждение систем РСА, отправляя на них ложные сигналы [3, 4]. Для работы имитатора нужны два типа входных параметров – изображение, описывающее земную поверхность, и параметры, имеющие цифровое описание. Они задаются оператором. МО, обрабатывая генерированные данные имитатора, должен получить входное изображение.

Для создания изображения МО накапливает информацию в течение большего количества периодов повторения. В реальной рабочей обстановке каждый период повторения состоит из двух этапов: передачи и приёма. На этапе передачи излучается предварительно выбранный зондирующий сигнал. В это время прием сигналов не совершается. Далее следует этап приема, где ожидается получение целевого сигнала. Он представляет собой отражение сигнала, излученного нами, который получается от объектов, рассматриваемых нами как целевые. В РСА целевым объектом считается та местность, изображение которой должно получиться. Во время имитации эта местность рассматривается как совокупность точечных целей

[5]. Для быстрого выполнения алгоритма как цели рассматриваются центры пикселей. Более точно основная задача РСА имитатора формулируется как генерация сигналов, ожидаемы на этапе приема. Решая эту задачу, имитатор становится инструментом для МО.

Сгенерированные данные имитатора состоят из временных отсчетов (отсчет), каждый из которых описывает сигнал, полученный в соответствующий момент времени. Эти отсчеты можно сгруппировать на отдельные порции по периодам (ПП). Следовательно, генерируемые данные можно представить в виде матрицы, где номера столбцов – это ПП, а строки – индексы отсчетов внутри ПП.

Число ПП обозначим буквой M_{rp} , оно является входным параметром, задаваемым оператором. Его значение определяется временем накопления информации.

Определим число отсчетов внутри ПП (N_{rp}). Оно зависит от длительности наблюдаемой части ПП и от частоты дискретизации (f_s) (1). Выбор частоты дискретизации зависит от задач, стоящих перед РСА. Для имитатора это является входным параметром. В реальной рабочей обстановке получение целевого сигнала в определенные моменты на этапе приема теоретически исключается. МО обычно отключает прием сигнала во время этих моментов. Следовательно, для получения данных, соответствующих реальным, оператором задаются входные параметры начала и конца (T_{st} , T_{end}) генерации эхосигнала внутри ПП.

$$N_{rp} = f_s(T_{end} - T_{st}).$$

Задача генерации эхосигнала преформируется в расчет матрицы с размером $[M_{rp} \times N_{rp}]$, где каждый элемент это комплексное число, которое описывает эхосигнал, полученный в определеннй момент времени. Процесс

расчета значений элементов столбцов (элементов внутри каждого ПП) идентичен, для каждого меняется только позиция носителя РСА относительно начальной точки. Рассмотрим процесс для одного. Он состоит из двух этапов: азимутальное кодирование и импульсное кодирование.

В каждом отсчете внутри ПП получается сумма отражений от нескольких целей. Разделим цели по двум критериям: а) цели, которые имеют равные расстояние от РСА, и б) цели с одинаковыми азимутами по отношению к РСА. Азимутальное кодирование осуществляет складывание сигналов от целей по первому критерию, а импульсное кодирование – по второму.

Азимутальное кодирование

Каждый отсчет внутри периода повторения описывает полученный эхосигнал в конкретный момент времени. Предположим, длительность зондирующего сигнала совпадает со временем соответствующей длительности одного отсчета ($1/f_s$), т.е. отражение от каждой цели получается в виде сигнала, состоящего из одного отсчета.

Таким образом, получается, что каждый отсчет описывает цель, находящуюся на конкретном расстоянии. Но поскольку диаграмма направленности РСА довольно широкая, то будут существовать несколько целей, у которых будет одинаковое расстояние от радара (рис. 1). Следовательно, в отсчете соответствующей определенной дальности будет получаться сигналы от нескольких целей.

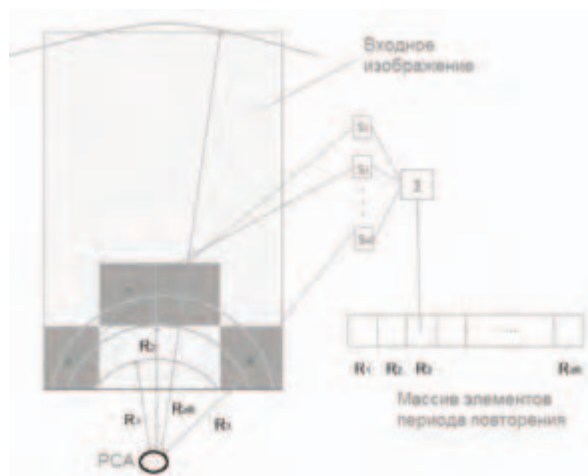


Рис. 1. Азимутальное кодирование

Этап генерации данных, где объединяются сигналы от целей с одинаковыми дальностями от PCA, но с разных направлений по азимуту, называется азимутальным кодированием. Поскольку в нашем случае источником, описывающим цели, является изображение, следовательно, под целями с разными азимутами могут рассматриваться пиксели из разных столбцов.

Данные, сгенерированные на этом этапе, должны стать входными для этапа импульсного кодирования. Для получения этих данных совершается цикл по всем элементам массива отсчетов внутри ПП. Для каждого элемента вычисляется дальность целей (R_i), от которых должны приниматься эхосигналы (2). Если эта дальность меньше, чем расстояние от самой близкой цели ($R_{\min}$), или больше, чем максимальная ($R_{\max}$), это означает, что сигнал в этом элементе отсутствует, и этому элементу присваивается значение ноль. Для остальных рассматриваются

все столбцы изображения, и для каждого столбца (m) вычисляется индекс строки (n), соответствующий текущей дальности. Естественно, надо иметь в виду, что в некоторых столбцах эта дальность будет отсутствовать (будет маленькая или большая, рис. 2). Такое случается, когда, например, рассматриваются первые отсчеты в крайних столбцах. Наименьшая дальность может быть больше, чем дальность, соответствующая этому отсчету (рис. 1, R_1). В таком случае этот ход просто пропускается. После того как получены координаты всех пикселей, соответствующие этой дальности, вычисляется сигнал от центра каждого пикселя, и результат складывания присваивается этому отсчету (3). Расстояние считается от центра пикселя, потому что целевыми объектами рассматриваются центры пикселей. Процесс вычисления индекса строки пикселя и расстояние от центра будут рассмотрены далее.

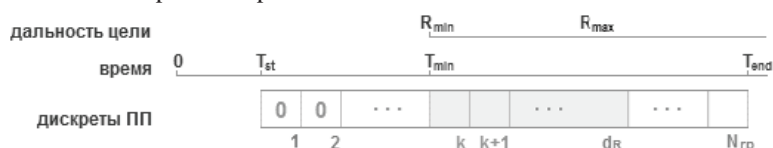


Рис. 2. Азимутальное кодирование, целевой сигнал в периоде

$$R_j = R_{min} + \frac{j - k}{f_s}$$

$$S_j = \begin{cases} \sum_{m=1}^M A_{mn} e^{i(\frac{2\pi R_{jmn}}{\lambda})}, & j = \overline{k, d_R} \\ 0 + i \cdot 0 & j = \overline{1, k-1} \text{ и } j = \overline{d_R+1, N_{rp}} \end{cases}$$

$$k = \frac{2R_{min}}{C} f_s,$$

$$d_R = 2R_{max} \frac{f_s}{c},$$

где S – выходные данные этапа азимутального кодирования, M – ширина изображения в пикселях, A – массив относительных коэффициентов, описывающих мощность отражения от целей, получаемый от яркости пикселей изображения, R_{jmn} – расстояние от центра пикселя с координатами (i, j) от PCA, λ – длина волны сигнала, d_R – номер отсчета, соответствующий максимальной дальности, j – индекс отсчета внутри массива ПП, m – индекс столбца пикселя, n – заранее

вычисленный индекс строки пикселя, i – мнимая единица.

Вернемся к задаче вычисления индекса строки для целевого пикселя при заданном ПП и отсчета внутри его. Перечислим входные параметры, которые описывают физические характеристики радара. PCA находится на высоте h , излучает сигналы под углом α , ширина диаграммы направленности по углу места β (рис. 3, а).

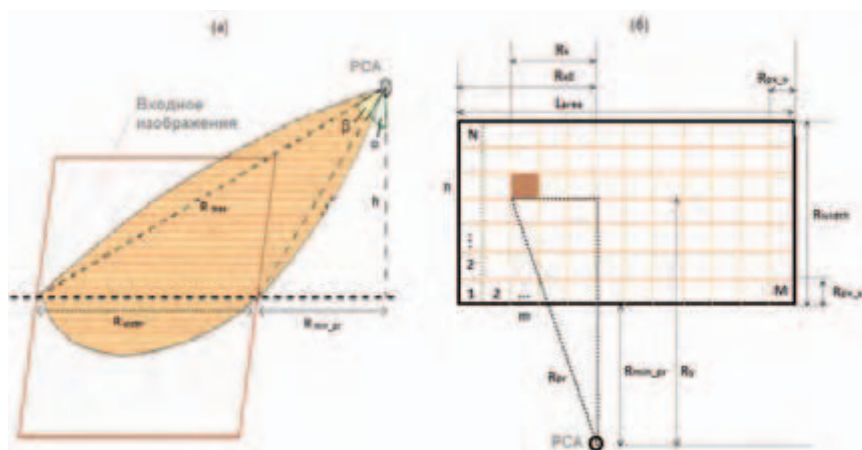


Рис. 3. Позиция PCA по отношению к земной поверхности:

а) трехмерная, б) двумерная

Предположим, рассматривается некий отсчет d , которому соответствует дальность R_d (4).

$$R_d = \sqrt{R_{pr}^2 + h^2}$$

где R_{pr} – проекция R_d на земле, h – высота носителя РСА, который является входным параметром, R_d – вычисляется исходя от номера отсчета. Он равняется половине того пути, который проходит свет за время t_d (5). Это обуславливается тем, что радиосигнал идет и возвращается, т.е. тот же путь преодолевает два раза. t_d – это время, соответствующее отсчету i_d , которое зависит еще и от частоты, дискретизации f_s и времени, соответствующему первому отсчету (t_{min}) (6). Последний, в свою очередь, зависит от дальности РСА до начала изображения (минимальная дальность, R_{min}) (7):

$$R_d = \frac{t_d c}{2}$$

$$t_d = t_{min} + \frac{i_d}{f_s}$$

$$t_{min} = \frac{2R_{min}}{c}$$

$$R_{min} = \alpha \frac{h}{\cos}$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Для нахождения индекса строки пикселя надо вычислить R_{pr} . От (5–8) получается:

$$R_{min} = \alpha \frac{h}{\cos} + \frac{i_d c}{2f_s}$$

Используя (9) и (4), получается:

$$R_{pr} = \sqrt{\left(\frac{h}{\cos}\right)^2 - h^2} + \frac{i_d c}{2f_s}$$

Сейчас, когда уже получено значение проекции R_d , можно перейти на двумерное пространство – поверхность земли (рис. 3, б):

$$R_{pr} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

$$R_x = |R_{x0} - mR_{pxx}|$$

$$R_{pxx} = \frac{L_{area}}{M}$$

$$R_{x0} = vi_{PRI} t_{PRI}$$

Из формул (11–14) получаем формулу (15), в которой используя (10), можем получить значение R_y :

$$R_y = \sqrt{R_{pr}^2 - (R_{x0} - m \frac{L_{area}}{M})^2}$$

где L_{area} – длина территории по абсциссе, соответствующей изображению (входной параметр), M – ширина изображения в пикселях, R_{pxx} – дальность, соответствующая 1-ому пикселю по абсциссе, m – индекс рассматриваемого столбца изображения, R_{x0} – расстояние носителя РСА от начала изображения по абсциссе (подразумевается, что носитель движется по оси абсцисс с постоянной скоростью), v – скорость носителя РСА, i_{PRI} – номер рассматриваемого ПП, t_{PRI} – длительность ПП (входной параметр).

$$R_y = R_{pr}(\min_pr) + nR_{px_y}$$

$$R_{pxy} = \frac{R_{width}}{N}$$

$$R_1(min_1 pr) = h \tan \alpha$$

где R_{min_pr} – проекция минимальной дальности на земле, n – индекс строки целевого пикселя, R_{px_y} – дальность, соответствующая 1 пикселю по ординате, N – высота изображения в пикселях, R_{width} – дальность, соответствующая изображению по ординате (входной параметр).

Из (16–18) следует, что индекс строки равняется:

$$n = N \frac{R_y - h \tan \alpha}{R_{width}}$$

Используя (15) и (19), вычисляется индекс n . Если он находится в диапазоне $[0, N-1]$, то вычисляется расстояние до центра пикселя с индексами (n, m) (20–22). После чего вычисляется сигнал от него и начинается процесс для следующего столбца (3). В противном случае, когда n имеет другое значение ($n \notin [0, N-1]$), это означает, что данная дальность в этом столбце отсутствует и сигнал от этого столбца не считается.

$$R_x = |R_{x0} - R_{px_x}(m - 0.5)|$$

$$R_y = R_1(min_pr) + nR_-(px_y)(n - 0.5)$$

$$R_{jmn} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + h^2}$$

Аналогичным образом получают индексы для всех столбцов и считается сумма сигналов от соответствующих пикселей (целей). Этот процесс повторяется для всех отсчетов внутри ПП. Таким образом, этап азимутального кодирования завершается. После чего начинается этап импульсного кодирования.

Импульсное кодирование

На этапе импульсного кодирования рассматриваются цели с одинаковыми азимутами. Отражение, получаемое от первой (самой близкой) цели, будет получаться в первых d_c отсчетах (23). Сигнал получается в нескольких отсчетах, потому что длительность зондирующего сигнала больше, чем время, соответствующее одному отсчету.

$$d_c = t_c f_s$$

Отражение от второй цели получается в отсчетах с индексами $[2, d_c+1]$. Отсюда следует, что в первом отсчете получится отражение от одной цели, во втором – от двух, в третьем – от трех (если d_c не меньше, чем 2 (или 3)) и т.д. Число получаемых отражений в следующих отсчетах линейно вырастет до d_c . Далее в диапазоне $[d_c, d_r]$ будет постоянным со значением d_c (рис. 4, а). Так получается, потому что в отсчете с индексом (d_c+1) отражение от первой цели больше не получится, в отсчете с индексом (d_c+2) не получится отражение от первой и от второй цели и т.д. Начиная с отсчета с индексом d_r число принимаемых отражений начнет уменьшаться, а в отсчете с индексом (d_r+d_c-1) получится последняя часть (отсчет) сигнала от самой далекой цели, которая находится на расстоянии R_{dr} .

Таким образом, для получения значения конкретного отсчета на этапе импульсного кодирования нужно сделать столько пар операций, сколько отражений принимается (24). По количеству обрабатываемых элементов вектор значений можно разделить на 3 части со следующими границами $[1, d_c-1]$, $[d_c, d_r]$ и $[d_r+1, d_r+d_c-1]$.

$$B_n = \begin{cases} \sum_{i=1}^n C_i S_{n-i}, & 1 \leq n \leq d_c - 1, \\ \sum_{i=1}^{d_c} C_{i+n-d_c} S_{d_c-i}, & d_c \leq n \leq d_R, \\ \sum_{i=n-d_R+1}^{d_c} C_i S_{d_R-d_c+i}, & d_R + 1 \leq n \leq d_R + d_c - 1, \end{cases}$$

где S – это данные, полученные после азимутального кодирования, а C – вектор зондирующим сигналом. Такой метод получения данных называется прямым суммированием. Заметим, что вычислительная сложность этого алгоритма будет $O(d_R d_{\text{chirp}})$.

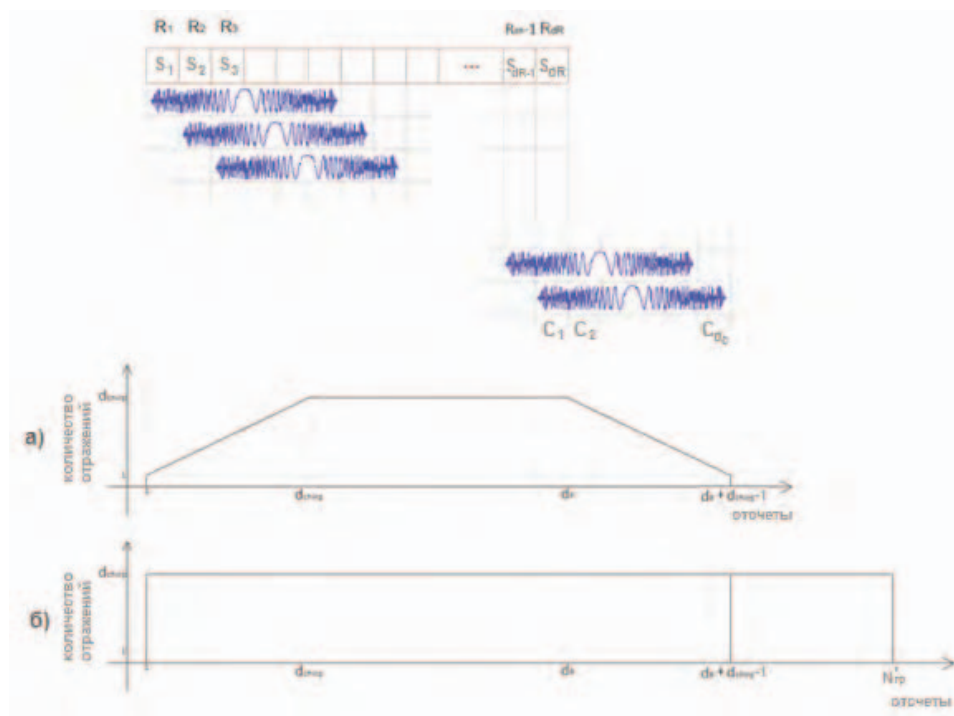


Рис. 4. Импульсное кодирование, количество принимаемых отражений:

а) прямое суммирование, б) быстрая свертка

Решение вышепредложенной задачи эквивалентно результату быстрой линейной свертки двух конечных последовательностей S и C . Данный метод применяет алгоритм быстрого преобра-

зования Фурье (БПФ), тем самым обеспечивая квазилинейную ($O(N \log N)$) сложность решения задачи [6].

$$B = S \cdot C$$

Если размер массива данных $(d_R + d_c - 1)$ не является степенью 2, то во время свертки количество обрабатываемых отсчетов увеличивается до следующей степени 2 (25) (рис. 4, б).

$$N_{rp} = 2^{\lceil \log_2(d_{chirp} + d_R) \rceil}$$

При достаточно маленьких значениях d_R и d_c прямое суммирование более эффективно, но количество данных в РСА довольно большое и предпочтительнее использовать быструю линейную свертку. Например, в случае, где каждая цель описывает квадрат с площадью 1 м^2 , минимальная дальность – 100 м, а максимальная – 1 км, получаются следующие значения:

$$f_s = \frac{1}{\frac{2 \cdot 1 \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 150 \cdot 10^6 \text{ Гц}$$

$$t_c = \frac{2 \cdot 100 \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 0.66 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$d_c = 150 \cdot 10^6 \text{ Гц} \cdot 0.66 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 100$$

$$d_R = \frac{2 \cdot 1100 \text{ м} \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ Гц}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 1100$$

При таких условиях прямое суммирование потребует $1.1 \cdot 10^5$ умножений, а прямая свертка – 11264. Имея ввиду, что в реальных условиях объём данных гораздо больше, эта разница будет расти и эффективнее использовать второй метод.

На основе вышепредложенного механизма предложена модель и полная система имитатора. Имея возможность генерировать данные на основе входного файла изображения, такая модель будет легче проверяемой для оператора и разработчиков МО. Кроме того, это позволит избежать многих усилий для представления окружающей среды с помощью отдельных целей.

Дата представление статьи: 28.02.2015

ЛИТЕРАТУРА

1. Тверской Г.Н., Терентьев Г.К., Харченко И.П. Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. Л.: Судостроение, 1973. 223 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Түрук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
3. Liu, Q. F., S. Q. Xing, X. S. Wang, and J. Dong, "A stripmap SAR coherent jammer structure utilizing periodic modulation technology," Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 28, 111–128, 2011.
4. Dai, D. H., X. F. Wu, X. S. Wang, and S. P. Xiao, "SAR activedecoys jamming based on DRFM," IET International Conference on Radar Systems, 1–4, 2007.
5. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.В. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны: Радио и Связь, 1988. – 236с
6. Rabiner L.R., Gold B. Theory and application of digital signal processing. Prentice-Hall, 1975, 762p.

ՄՈՒՏՔԱՅԻՆ ՆԿԱՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՍԻՆԹԵԶՎՈՂ ԱՊԵՐՏՈՒՐՈՎ ՌԱԴԱՐԻ
ԱՆԴՐԱԴԱՐՁԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՆՄԱՆԱԿԱՆԱՑՎՈՂ ՄՈԴԵԼ

ԱՐԹՈՒՐ ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ

Ասպիրանտ, ՀՀ ԳԱԱ, Բնֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտ

ՄՀԵՐ ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ

*Տեխնիկական գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր,
Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտի տնօրեն*

Դիտարկված է մուտքային նկարի հիման վրա սինթեզվող ապերտուրով ռադարի (ՍԱՌ) անդրադարձային ազդանշանների գեներացիայի մեխանիզմը: Նմանակչի կողմից գեներացված տվյալները նախատեսված են ՍԱՌ-ի մշակման մոդուլի մշակման և փորձարկման պարզեցման համար: Ներկայացված է իրական անդրադարձային ազդանշաններին համապատասխանող տվյալների ստացման մաթեմատիկական մոդել:

Հոդվածի ներկայացման տարեթիվը՝ 28.02.2015

THE ECHO SIGNALS SIMULATION MODEL FOR SYNTHETIC APERTURE
RADAR BASED ON INPUT IMAGE

ARTUR TADEVOSYAN

*National Academy of Sciences of the Republic of Armenia,
Institute for Informatics and Automation Problems
Postgraduate Student*

MHER MARKOSYAN

*Yerevan Telecommunication Research Institute, Director
Doctor of Technical Sciences, Professor*

In the article the generation mechanism of echo signals for a Synthetic Aperture Radar (SAR) are reviewed. The generated data is destined for a development and testing of SAR processing module. Two types of inputs are needed for simulator operation – an image that describes the surrounding area and parameters with digital description.

Article submission date: 28.02.2015