

## ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕПОДВИЖНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ, ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ И МЕТОДА СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ

К. А. Лукин, А. А. Могила, П. Л. Выплавин

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины,  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [lnes@kharkov.com](mailto:lnes@kharkov.com); [tolya@ire.kharkov.ua](mailto:tolya@ire.kharkov.ua)*

Разработан новый метод получения радиоизображений с помощью радаров с синтезированной апертурой с использованием шумовых/случайных сигналов и неподвижной не переключаемой антенной решетки, предложенных в [1]. Основная идея метода состоит в выделении из полного сигнала одноканального приемника той его части, которая излучается отдельным элементом решетки. Такое выделение реализуется с помощью корреляционного приема широкополосных шумовых/случайных сигналов, излученных и принятых антенной решеткой с взаимной задержкой между ее элементами, превышающей время корреляции излучаемого сигнала. Преимущество предложенного метода получения радиоизображений состоит в отсутствии необходимости механического перемещения или электронного переключения элементов антенной решетки, что упрощает ее конструкцию и снижает стоимость. Описан алгоритм генерации радиоизображений и представлены результаты компьютерного моделирования работы шумового радара с предложенной антенной решеткой. Ил. 6. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, антенная решетка.

Для построения радара с синтезированной апертурой (РСА) обычно требуется механическое движение приемопередающей аппаратуры [2, 3]. Недавно была разработана другая концепция построения РСА, основанная на электромеханическом перемещении [4-5] излучателя вдоль неподвижной апертуры или электронном переключении элементов антенной решетки [6]. Электромеханическое перемещение осуществлено с помощью скольжения резонансной щели в системе, выполненной на основе волноводной техники. В работе [1] предложен новый метод получения радиоизображений с помощью неподвижной не переключаемой антенной решетки, который основан на корреляционных свойствах шумовых/случайных сигналов. Основная идея метода состоит в выделении из полного сигнала одноканального приемника той его части, которая излучается отдельным элементом решетки. Такое выделение реализуется с помощью корреляционного приема широкополосных шумовых/случайных сигналов, излученных и принятых антенной решеткой с взаимной задержкой между ее элементами, превышающей время корреляции излучаемого сигнала. Нами рассмотрен принцип действия неподвижной антенной решетки и приведены результаты моделирования ее работы.

**1. Устройство антенной решетки с синтезированной апертурой.** Рассмотрим антенную решетку, состоящую из последовательности излучателей  $A_q$ , расположенных эквидистантно на линии, которая в прямоугольной системе координат  $X, Y, Z$  параллельна оси  $X$  (рис. 1). Здесь  $q = 0, 1, \dots, Q$  - номер излучателя;  $Q + 1$  - число

излучателей в антенной решетке;  $z_0$  - ее высота над плоскостью  $X, Y$  сцены (рис. 1,а);  $0, 0, z_0$  - координаты фазового центра излучателя  $A_{Q+1/2}$ ;

$x_i, y_i, 0$  - координаты  $i$ -го участка локального отражения  $P_i$ . Расстояние  $D_i q$  от  $q$ -го излучателя до  $i$ -го участка локального отражения для линейной антенной решетки может быть записано в виде соотношения

$$D_i q = \sqrt{z_0^2 + y_i^2 + (x_i - x_q)^2},$$

где  $x_q, 0, z_0$  - координаты  $q$ -го излучателя  $A_q$  в прямоугольной системе  $X, Y, Z$ . Как показано на рис. 1, сигнал на вход каждого излучателя поступает через ряд последовательно соединенных линий задержки  $\tau_q$ . Поэтому сигнал, поступающий на него, запаздывает относительно сигнала, поступающего на предыдущий излучатель. Зондирующий сигнал на входе излучателя  $A_q$  запаздывает по отношению к сигналу на входе (выходе)

антенной решетки на время  $T_q = \sum_{i=0}^q \tau_i$ . Отраженные от сцены сигналы могут приниматься обычной рупорной антенной.

**2. Получение радиоизображений с помощью неподвижной антенной решетки.** Обработка данных, полученных с помощью предложенной антенны, подобна получению радиоизображений с помощью радара с синтезированной апертурой. Тем не менее, между ними существуют отличия. В предложенном методе для передачи случайных сигналов используются ан-

тенная решетка и одноканальный передатчик, а для приема - также одна антенна и одноканальный приемник. В случае если задержки между

излучателями выбраны оптимально, мы можем использовать стандартные алгоритмы для сжатия по азимуту и по дальности.

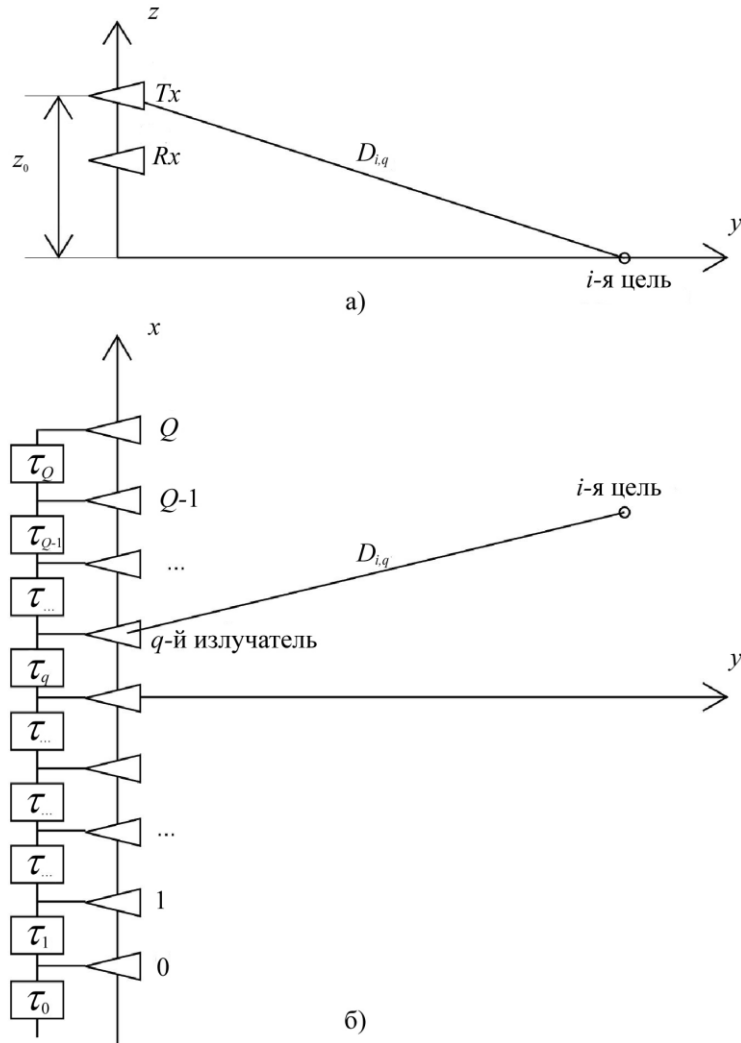


Рис. 1. Блок-схема неподвижной некоммутируемой антенной решетки

Отличием от обычного РСА будет использование копий одного и того же сигнала вместо различных сигналов для отдельных излучателей. На рис. 2 приведен пример получения сигналов для различных излучателей в антенной решетке из четырех элементов. Обработка полученных таким образом данных с помощью обычного РСА процессора позволит получить радиоизображение. Сигнал на выходе цифрового согласованного фильтра  $B_r l$  может быть представлен в виде

$$B_r l = \sum_{i=1}^l a_i \varphi_i \sum_{q=0}^Q B_{\Sigma} [T_{i,q} f_d - l] \times \exp -j2\pi f_0 - F_0 T_{i,q} , \quad (1)$$

где  $T_{i,q} = \frac{2D_i q}{c} + \sum_{m=0}^q \tau_m$  - суммарное время задерживания сигнала за счет его распространения во внешнем пространстве и в  $q+1$  линиях задержки;  $a_i \varphi_i = \beta_i G \varphi_i$  - амплитудный множитель для сигнала, отраженного  $i$ -м участком локального отражения;  $\beta_i$  - множитель, учитывающий затухание радиоволн при их распространении до участка локального отражения и обратно, а также модуль и фазу коэффициента отражения;  $G \varphi_i$  - множитель диаграммы направленности излучателя;  $\varphi_i$  - угол между осью  $Y$  и на-

правлением на  $i$ -й участок локального отражения;  $l$  – количество участков локального отражения;  $B_{\Sigma} \bullet$  – выходной сигнал оптимального фильтра для  $i$ -го участка локального отражения и  $q$ -го элемента антенной решетки;  $c$  – скорость света;  $f_d$  – частота дискретизации;  $f_0$  – средняя частота спектра зондирующего сигнала;  $F_0$  – средняя частота спектра отраженного сигнала в диапазоне основных частот. Накопление импульсов выполняется с целью улучшения отношения сигнал/шум.

Из соотношения (1) следует, что для одиночного участка локального отражения выходной сигнал  $B_r$  согласованного фильтра состоит из последовательности откликов  $B_{\Sigma}$ , максимумы которых расположены в окрестности дискретных моментов времени  $l = T_{i,q} f_d$ . Если время запаздывания  $\tau_m$  в каждом элементе линии задержки намного превышает интервал корреляции  $\tau_c$  зондирующего сигнала

$$\tau_m > \tau_c, \quad (2)$$

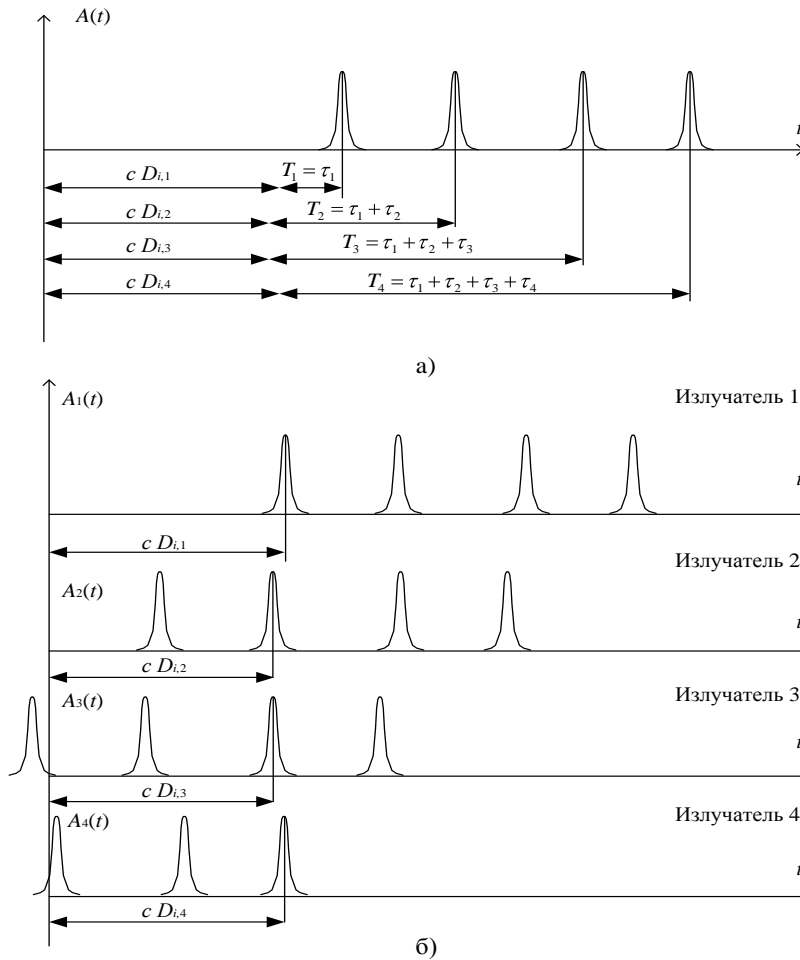


Рис. 2. Диаграмма, поясняющая излучение и прием импульсных сигналов в рассматриваемой антенне с синтезированной апертурой: а) - сигнал на выходе корреляционного приемника; б) - сигналы, соответствующие различным излучателям

то в первом приближении взаимное влияние излучателей по внутреннему и внешнему пространствам можно не учитывать. Кроме того, выполнение этого условия позволяет произвести разделение шумовых радиолокационных отражений в одноканальном приемнике. Тогда второй этап получения радиоизображения будет представлять собой процесс цифрового синтеза апер-

туры антенны. Он может быть описан с помощью соотношения

$$J(x, y) = \sum_{v=0}^Q B_r[l_d(v, x, y)] h(v, x, y), \quad (3)$$

где  $l_d(v, x, y) = f_d \left( \frac{2D(v, x, y)}{c} + \sum_{p=0}^v \tau_p \right)$ .

количество длин волн частоты дискретизации, которое укладывается на удвоенном пути

$$D \nu, x, y = \sqrt{z_0^2 + y^2 + x - x_v}^2$$

распространения радиоволн от  $\nu$ -го элемента антенной решетки до точки  $x, y$  фокусировки луча и обратно и их периодов в  $\nu$  элементах линии задержки;

$$h \nu, x, y = \exp j2\pi l_\lambda \nu, x, y -$$

опорная функция;

$$l_\lambda \nu, x, y = f_0 \left( \frac{2D \nu, x, y}{c} + \sum_{p=0}^{\nu} \tau_p \right) -$$

количество длин излучаемых радиоволн, укладываемое на удвоенном пути  $D \nu, x, y$  до точки отражения и их периодов в  $\nu$  элементах линии задержки.

**3. Моделирование.** Для того, чтобы показать возможность получения радиоизображений с помощью описанного метода, было проведено моделирование антенной решетки с синтезированной апертурой. При этом были использованы модель точечных отражателей [7] и теория линейных динамических систем. Мы предполагаем, что излучаемый сигнал проходит через антенную решетку без отражений и ослабления.

На рис. 3 приведено радиоизображение двух точечных отражателей, которые расположены на расстоянии 65 м в точках -5 и 5 м по поперечной дальности, полученное для равных временных задержек между излучателями решетки ( $\tau_q = \tau$ ). Из рисунка видно, что наряду с истинными радиоизображениями точечных отражателей в точках (65, -5) и (65, 5) в полученном изображении присутствуют множественные ложные отклики (призраки). Таким образом, предложенный метод и эквидистантная решетка позволяют однозначно разрешить цели по азимуту, однако этому сопутствует появление ложных откликов, расположенных на различных дальностях, отвечающих данному азимуту. Количество ложных откликов зависит от количества элементов антенной решетки. Действительно, сигнал от излучающего элемента с номером  $q$ , отраженный целью на расстоянии  $R$ , аналогичен сигналу от излучающего элемента  $q+1$ , отраженному целью на расстоянии  $R - c\tau_q$ . Поскольку задержки между элементами равны между собой, отклики от данного элемента отражения совпадут с таковыми от цели, смещенной на  $c\tau$ . Исключение составит крайний отклик, который более не будет участвовать в сжатии по азимуту. Таким образом, решетка из  $Q$  элементов будет иметь  $2Q-1$  ложных

целей:  $Q-1$  на большем расстоянии и столько же – на меньшем. При этом ширина отклика по азимуту будет увеличиваться, а его амплитуда – уменьшаться по мере удаления от действительного положения цели.

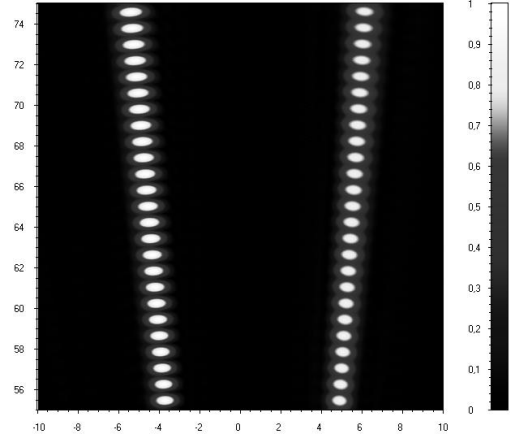


Рис. 3. Радиоизображение двух точечных отражателей, полученное с помощью антенной решетки с равными задержками (моделирование)

Частично проблема этой неоднозначности может быть решена путем добавления линейного приращения задержек между элементами решетки:  $\tau_q = \tau + q\Delta\tau$ . При получении радиоизображения в точке, соответствующей положению цели, задержки, используемые при сжатии по азимуту, совпадут с фактическими задержками сигнала между элементами решетки. Для расстояния, меньшего на  $\tau$ , разница в фактической задержке и той, которая используется при получении радиоизображения, будет равна

$$\Delta T_q = \sum_{p=0}^q p \Delta\tau - \sum_{p=0}^{q-1} p \Delta\tau = q \Delta\tau .$$

Такая зависимость задержки от номера щели аналогична линейному фазовому набегу от щели, находящейся на другом азимуте. За счет этого ложная цель будет смещена по азимуту по отношению к действительной на угол

$$\phi = \arctg \left( \frac{\Delta\tau c}{d} \right),$$

где  $d$  - расстояние между излучающими элементами. Это позволяет выбрать задержки таким образом, чтобы вывести часть ложных целей за пределы главного лепестка диаграммы направленности элемента решетки.

На рис. 4 приведено радиоизображение одного точечного отражателя, где линейное изменение временных задержек между излучателями позволило вывести часть ложных целей за пределы главных лепестков излучателей. По сравнению с рис. 3 число ложных целей меньше и они находятся на большем расстоянии друг от

друга. Используя этот прием, можно освободить некоторую часть радиоизображения от ложных целей.

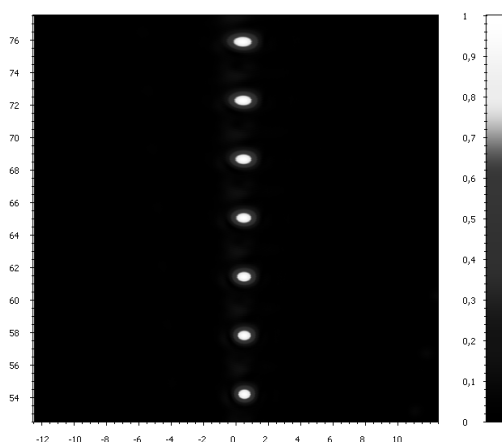


Рис. 4. Радиоизображение одного точечного отражателя, полученное с помощью антенной решетки с линейно изменяющимися задержками между элементами (моделирование)

Поскольку ложные отклики в радиоизображении появляются вследствие периодического размещения излучателей антенной решетки, то их разрушения можно добиться, если использовать неэквидистантную антенную решетку со специальным законом распределения задержек между элементами.

Для достаточно большого количества элементов можно использовать распределение, порождаемое  $m$ -последовательностями или специальными кодами, обладающими уникальными автокорреляционными свойствами, обеспечивающими отклик с единственным максимумом, например, распределение Люкке-Шутгена. Однако для тех, кто развивает шумовую радиолокацию, естественным приемом для устранения упомянутой неоднозначности будет применение распределения задержек, порождаемого случайным процессом. Очевидно, что такой подход требует усреднения по ансамблю реализаций соответствующего случайного процесса. Применительно к исследуемой антенной решетке это означает необходимость многократного излучения и приема шумовых сигналов при вариации задержек между элементами по случайному закону, обеспечивающему единственный корреляционный максимум, что позволяет исключить неоднозначность по дальности для неподвижной и не переключаемой антенны с синтезированной апертурой. По сути, при получении радиоизображения с помощью такой антенны в точке, отличной от действительного положения цели, отклики от нее будут формировать случайный фазовый фронт на апертуре решетки. Это приведет к расфокусированию всех ложных радиоизображений. Таким образом, путем введения случайных задержек между эле-

ментами решетки, можно избавиться от периодически расположенных ложных откликов. Тем не менее, энергия от них останется на радиоизображении в виде случайного (шумового) фона. Уровень этого фона определяется количеством излучателей в антенной решетке и законом распределения задержек. Причем, чем больше излучателей, тем ниже уровень фона. Для существенного уменьшения уровня фона следует провести усреднение по ансамблю случайных задержек в антенной решетке. Пример работы такой решетки с усреднением по ансамблю задержек и без него показан на рис. 5 и рис. 6.

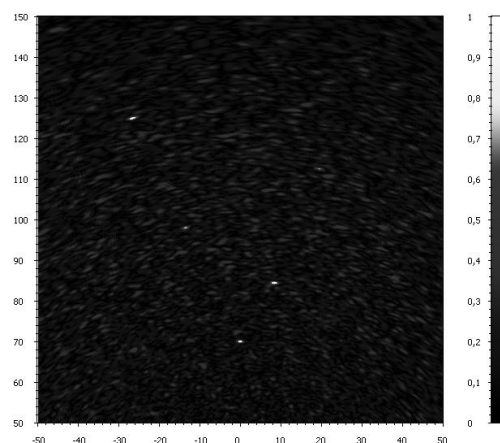


Рис. 5. Радиоизображение пяти точечных отражателей, полученное с помощью антенной решетки со случайными задержками между элементами, полученное по одной реализации

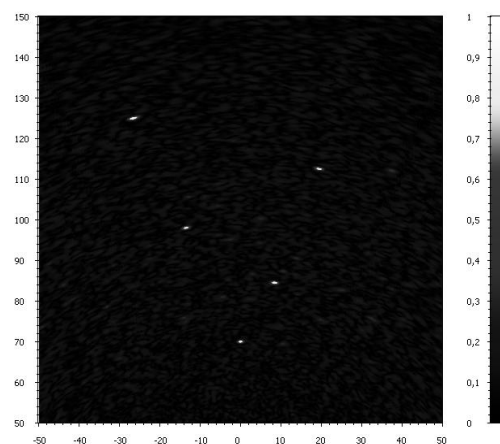


Рис. 6. Радиоизображение пяти точечных отражателей, полученное с помощью антенной решетки со случайными задержками между элементами, полученное путем усреднения по ансамблю из десяти реализаций временных задержек

**Выводы.** Таким образом, исследован метод получения радиоизображений, использующий неподвижную и не переключаемую антенную решетку и корреляционные свойства шумовых сигналов. Запаздывание сигналов между излу-

телями решетки, превышающее время корреляции шумового сигнала, позволяет разделить радарные отклики в одноканальном корреляционном приемнике и получить радиоизображение. Однако в отличие от РСА с подвижными антеннами все элементы рассматриваемой неподвижной решетки излучают (принимают) сигналы одновременно, поэтому на радиоизображении будут появляться либо ложные цели, либо шумовой фон в зависимости от выбранного распределения задержек между элементами решетки, борьба с которыми требует дополнительных усилий.

Преимущества предложенного метода и антенной решетки состоит в отсутствии необходимости в механическом перемещении или электронном переключении излучателей решетки, что упрощает ее конструкцию и уменьшает стоимость. Это открывает уникальные возможности разработки принципиально новых антенн с синтезированной апертурой с полностью неподвижными излучателями, которые могут применяться как для решения задач дистанционного зондирования, контроля и мониторинга различных объектов, так и для построения обзорных радарных систем.

В заключение отметим, что предлагаемый метод может быть применен и при построении панорамных сонаров и ультразвуковых радаров для дистанционного контроля различных объектов.

1. *Lukin K., Mogyla A.* Static Nonswitchable Antenna Array for Ground-Based Noise Waveform SAR // Proc. IRS 2006, International Radar Symposium (24-26 May 2006) Krakow, Poland. - 2006. - P.469-472
2. *Sherwin C. W., Ruina J. P., Rawcliffe R. D.* Some Early Developments in Synthetic Aperture Radar System // IRE Trans. - 1962. - MIL-6. - P.111-115.
3. *Tarchi D., Rudolf H., Luzzi G.* SAR Interferometry for Structural Changes Detection: A Demonstration Test on a DAM // Proc. of IGARSS'99. - 1999. - P.1522-1524.
4. *Lukin K. A.* A Novel Approach to Scanning Antenna Design // Proceedings 4-th Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol. - 2003. - 11. - P.290-293.
5. *Lukin K. A.* Sliding Antennas for Noise Waveform SAR // Applied Radio Electronics. - 2005. - 4, N1. - P.103-106.
6. *Venot Y., Younis M., Wiesbeck W.* Compact Forward Looking SAR using Digital Beam Forming on Receive Only // Proc. EUSAR2000, Munich. - 2000. - P.795-798.

7. *Stager E. A.* Scattering of radio waves on complex-shaped objects // Radio and Communications. - M.: - 1986. - P.184.

## IMAGING USING A NON MOVING ANTENNA ARRAY, NOISE SIGNALS AND SAR METHOD

K. A. Lukin, A. A. Mogyla, P. L. Vyplavin

The work is dedicated to elaboration of a method of SAR imaging using noise/random signals and a non moving and non switching antenna array which were proposed in [1]. The main idea of the method consists in the extraction from the total signal of one channel receiver the signals radiated by a single element of the array. Such separation is done using correlation reception of the noise/random signals radiated and received by a antenna array with mutual delay between antenna elements higher than the correlation time of the radiated signal. Attractive advantage of the suggested the method for SAR imaging consist in no need in either mechanical motion or electronic switching of the antenna array elements, which simplify its design and lower the cost. The SAR imaging algorithm is described and the results of modeling of SAR using this antenna array are presented.

**Keywords:** synthetic aperture radar, antenna array.

## ОТРИМАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕРУХОМОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ, ШУМОВИХ СИГНАЛІВ І МЕТОДУ СИНТЕЗУВАННЯ АПЕРТУРИ

К. О. Лукін, А. А. Могила, П. Л. Виплавін

Розроблено новий метод отримання радіозображень за допомогою радарів з синтезованою апертурою з використанням шумових/випадкових сигналів і нерухомої антенної решітки, елементи якої не перемикаються. Цю антенну решітку та метод було запропоновано у роботі [1]. Основна ідея методу полягає у виділенні з повного сигналу одного прийомного каналу тієї його частини, яка випромінюється окремим елементом решітки. Таке розділення реалізується за допомогою кореляційного прийому широкосмугових шумових/випадкових сигналів, що випромінюються та прийняті антенною решіткою з взаємною затримкою поміж її елементами більшою за час кореляції сигналу. Переваги запропонованого методу отримання радіозображень полягають у відсутності потреби механічного руху або електронного перемикування елементів решітки, що спрощує її конструкцію та знижує вартість. Описано алгоритм генерації радіозображень та представлені результати комп'ютерного моделювання роботи шумового радара з описаними антенними решітками.

**Ключові слова:** радіолокатор з синтезованою апертурою, антенна решітка.

*Рукопись поступила 21 июля 2007 г.*