

Алгоритм повышения разрешения радиоизображения с помощью модельного удлинения когерентной пачки

77-30569/252747

11, ноябрь 2011

Нефедов С. И.

УДК 621.396.96

НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана

nefedov@bmstu.ru

Получение радиоизображений движущихся объектов высокого разрешения методом инверсного синтеза апертуры сопряжено с необходимостью получать когерентные пачки сигналов большой длительности. Часто в реальных условиях обеспечить значительное время накопления в когерентном режиме оказывается затруднительным из-за ограниченного времени наблюдения цели, либо из-за влияния среды распространения, нарушающей когерентные свойства сигнала. Для повышения разрешения и контрастности изображения наряду с различными алгоритмами сверхразрешения можно применить удлинение когерентной пачки сигнала с помощью адаптивной модели реального времени. Адаптивность модели заключается в том, что при ее расчете производится прогнозирование или оценивание некоторого набора параметров. Будем считать, что существует некоторый минимальный набор параметров, однозначно определяющий поведение объекта на некотором интервале времени. Будем называть такую модель минимально-параметрической, а ее использование при синтезе алгоритмов обработки информации – минимально-параметрическим подходом. В данной работе будем рассматривать применение минимально-параметрического подхода для повышения информативности синтезированных радиоизображений с целью выявления по короткой пачке мелких деталей изображения [1].

Суть предлагаемого метода заключается в прогнозировании поведения радиолокационного сигнала, применяемого для получения радиоизображений. Методики такого рода известны в цифровом спектральном анализе [2, 3], когда для улучшения визуального качества спектральной оценки обрабатываемую последовательность данных дополняют нулевыми отсчетами. Известны работы по обработке информации в радиовзрывателях [4, 5], когда за счет гарантирования одноцелевой обстановки и

характера отражающей поверхности удастся повысить в несколько раз разрешение по пачке очень малой длительности. Есть основание считать, что и при решении задач синтеза апертуры, когда априорная информация отсутствует, можно обеспечить некоторого улучшения изображения в том случае, когда предварительная структура системы блестящих точек в изображении уже получена, однако ни нужная контрастность, ни нужная разрешающая способность не достигнуты.

Пусть синтезирование производится внутри класса объектов, геометрическое описание которых хранится в некоторой базе данных. Неизвестны мелкие детали каждого из рассматриваемых объектов, однако наиболее характерные элементы узнаваемы. Ставится задача получить изображение, которое будет выявлять тип объекта с некоторой заданной вероятностью, а также обнаруживать скрытые мелкие неоднородности, лежащие за границами разрешения, обеспечиваемого длительностью пачки. При этом первоначальное разрешение достаточно для проявления в изображении сравнительно крупных деталей изображения. Алгоритм, позволяющий решить данную задачу, может быть следующим:

1) по первоначальной пачке $\xi(t)$ длительностью t_1 формируется изображение с разрешающей способностью $\delta(t_1)$;

2) по полученному изображению проводится предварительная классификация объекта и определяется один или несколько объектов, наиболее похожих на полученное изображение;

3) по полученному геометрическому образу выполняется минимально-параметрическое моделирование набора сигналов $V(t)$, состоящего из сигналов $v_i(t)$ протяженностью t_2 , где $i = 0 \dots N-1$ - номер объекта после предварительной классификации, а N - число объектов в классифицируемой последовательности;

4) по сигналу $\xi(t)$ и набору $V(t)$ формируется набор сумм $X(t)$, определяемых как:

$$x_i(t) = \begin{cases} \xi(t) : t \leq t_1 \\ v_i(t) : t_1 < t \leq t_1 + t_2 \end{cases} \quad (1)$$

5) по полученному набору строится набор изображений повышенного разрешения R_{δ_i} ;

6) из сформированных изображений выбирается то, для которого выполняется выбранный критерий соответствия полученного изображения истинному.

В качестве такого критерия целесообразно применить критерий максимума значений нормированных отсчетов блестящих точек относительно первоначального

изображения с последующим применением к сформированной выборке критерия k из m , где k - число блестящих точек в проверяемом радиоизображении, m - число блестящих точек в истинном радиоизображении. Применение эвристического критерия в данном случае оправдано тем, что при правильном выборе объекта опорные отсчеты могут уменьшиться только в случае расфокусировки изображения, что исключается алгоритмами автофокусировки, применяемыми при синтезе изображений. Случайные сбои сравнительно легко устраняются процедурой k из m , взятой с соответствующими вероятностными характеристиками.

Выбранное итоговое изображение R_δ будет обладать разрешающей способностью, определяемой временем $T = t_1 + t_2$. Такое разрешение, с одной стороны, оказывается несколько искусственным, поскольку базируется на модельном представлении о поведении объекта, однако, утверждая, что модель является минимально-параметрической, можно с заданной вероятностью утверждать, что опорная геометрия объекта осталась без изменения. Покажем, что при применении рассмотренного алгоритма удастся обнаружить малые элементы, отсутствующие в модельном представлении, такие, что их размер меньше первоначального элемента разрешения $\delta(t_1)$, но больше полученного далее в виде $\delta(t_1 + t_2)$.

Пусть имеется некоторый принятый сигнал $\xi(t)$

$$\xi(t) = \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + \xi_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t), \quad (2)$$

где $\xi_1 > \xi_2$ - амплитуды гармоник ω_1 и ω_2 соответственно, а ω_1 и ω_2 - частоты, а также сигнал $\zeta(t)$ вида

$$\zeta(t) = \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t). \quad (3)$$

Проведем дискретизацию полученных сигналов $\xi(t)$ и $\zeta(t)$

$$\xi[i] = \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot i \cdot \Delta t) + \xi_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot i \cdot \Delta t), \quad (4)$$

$$\zeta[k] = \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot k \cdot \Delta t), \quad (5)$$

где $i = 0, 1, \dots, N_1 - 1$,

$$N_1 = \frac{t_1}{\Delta t},$$

$$k = N_1, N_1 + 1, \dots, N_2 - 1,$$

$$N_2 = \frac{t_2}{\Delta t},$$

Δt - интервал дискретизации.

Сформируем суммарный сигнал $\xi_{\Sigma 1}[i+k]$ вида

$$\xi_{\Sigma 1}[i+k] = \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot i \cdot \Delta t) + \xi_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot i \cdot \Delta t) + \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot k \cdot \Delta t). \quad (6)$$

Проведем над суммарным сигналом (6) дискретное преобразование Фурье. Тогда, для полученного спектра можно записать:

$$S_{\Sigma 1l+m} = S_{\xi 1l} + S_{\xi 2l} + S_{\xi m}, \quad (7a)$$

где

$$S_{\xi 1l} = \sum_{i=0}^{\frac{t_1}{\Delta t}-1} \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot i) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot i \cdot l}{t_1}\right), \quad (7б)$$

$$S_{\xi 2l} = \sum_{i=0}^{\frac{t_1}{\Delta t}-1} \xi_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot i) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot i \cdot l}{t_1}\right), \quad (7в)$$

$$S_{\xi m} = \sum_{k=\frac{t_1}{\Delta t}}^{\frac{t_1+t_2}{\Delta t}-1} \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot k) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot k \cdot m}{t_2}\right). \quad (7г)$$

Проводя несложные преобразования, спектр (7a) можно легко преобразовать к виду

$$S_{\Sigma 1l+m} = \sum_{i=0}^{\frac{t_1+t_2}{\Delta t}-1} \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot j) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot i \cdot (l+m)}{t_1+t_2}\right) + S_{\xi 2l}. \quad (7д)$$

Определим сигнал $\xi[i]$ на интервале $0 \dots t_1+t_2$ и сформируем суммарный сигнал $\xi_{\Sigma 2}[i]$ как

$$\xi_{\Sigma 1}[i] = \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot i \cdot \Delta t) + \xi_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot i \cdot \Delta t), \quad (8)$$

где $i = 0, 1, \dots, \frac{t_1+t_2}{\Delta t} - 1$.

Проведем над сигналом (7) преобразование Фурье и получим для суммарного спектра следующее выражение:

$$S_{\Sigma 2l} = S_{\xi 1l} + S_{\xi 2l}, \quad (9a)$$

где

$$S_{\xi 1l} = \sum_{i=0}^{\frac{t_1+t_2}{\Delta t}-1} \xi_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot i) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot i \cdot l}{t_1+t_2}\right), \quad (9б)$$

$$S_{\xi 2l} = \sum_{i=0}^{\frac{t_1+t_2}{\Delta t}-1} \xi_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot i) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot i \cdot l}{t_1+t_2}\right). \quad (9в)$$

Сравнивая выражения (7) и (9) можно заметить, что гармоника с частотой ω_2 сохраняется как в первом, так и во втором случае, несмотря на то, что в первом случае она существовала существенно меньше времени. При этом интенсивность гармоники будет зависеть от соотношения времен t_1 и $t_1 + t_2$.

Поскольку суть процедуры, выполняющей синтез изображения и дискретного преобразования Фурье – однотипны [6], то можно утверждать, что при дополнении обрабатываемого сигнала выборкой, не содержащий некоторые сигналы, их гармоники будут сохраняться в сигнале в ослабленном на величину виде. По сути, утверждается, что применение модельных сигналов позволяет выявлять неразрешаемые гармоники, не обеспечивая накопление в них сигнала пропорционально времени когерентного накопления.

Для иллюстрации предлагаемого алгоритма рассмотрим простейшую факетную модель, состоящую из 9-ти идеально проводящих пластин (рис. 1). Для разрешения всех элементов данной модели необходимо обеспечить разрешающую способность по поперечной координате $\delta = 2,5$ м, соответствующую времени накопления $t = 0,2$ с.

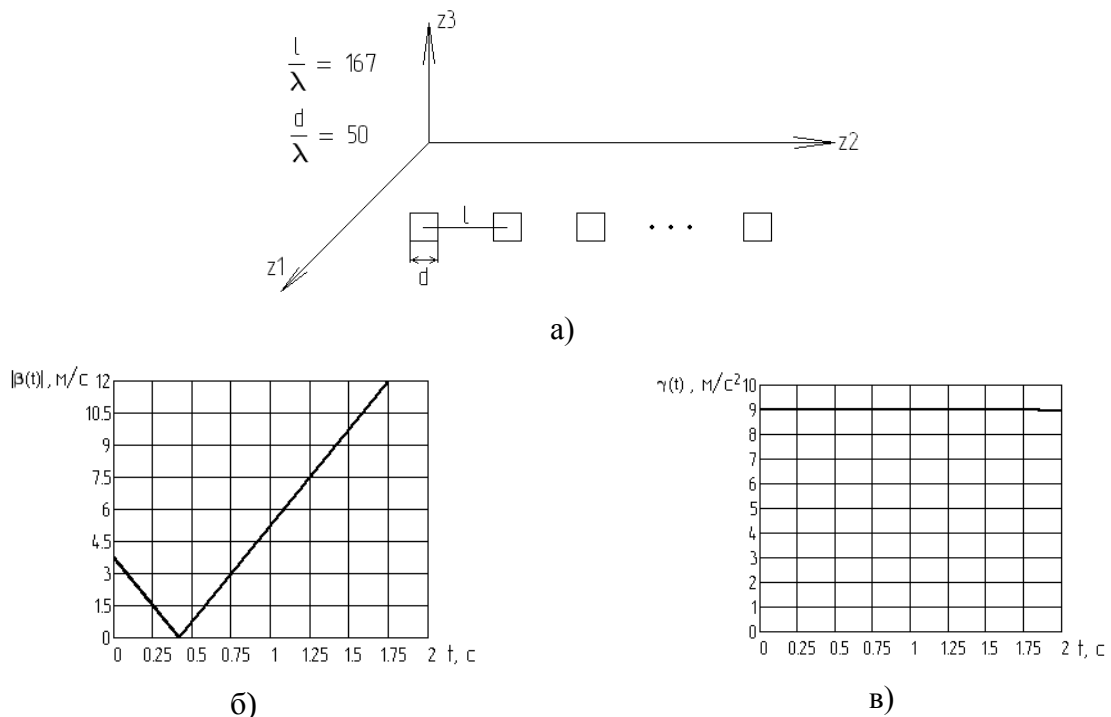


Рис. 1. Параметры факетной модели и условия ее наблюдения: а) внешний вид модели; б) зависимость радиальной скорости и в) зависимость радиального ускорения модели от времени синтеза апертуры антенны

На рис. 2а представлен азимутальный портрет факетной модели при времени накопления сигнала $t_1 = 0,13$ с, на рис. 2б – азимутальный портрет этой же модели в случае модельного удлинения пачки на $t_2 = 2 \cdot t_1$, $t_2 = 3 \cdot t_1$ и $t_2 = 10 \cdot t_1$ соответственно. При этом минимально-параметрическая модель строилась по первому изображению и включала в себя четыре факета, находящиеся в отсчетах с координатами 5 м, 15 м, 30 м, 45 м.

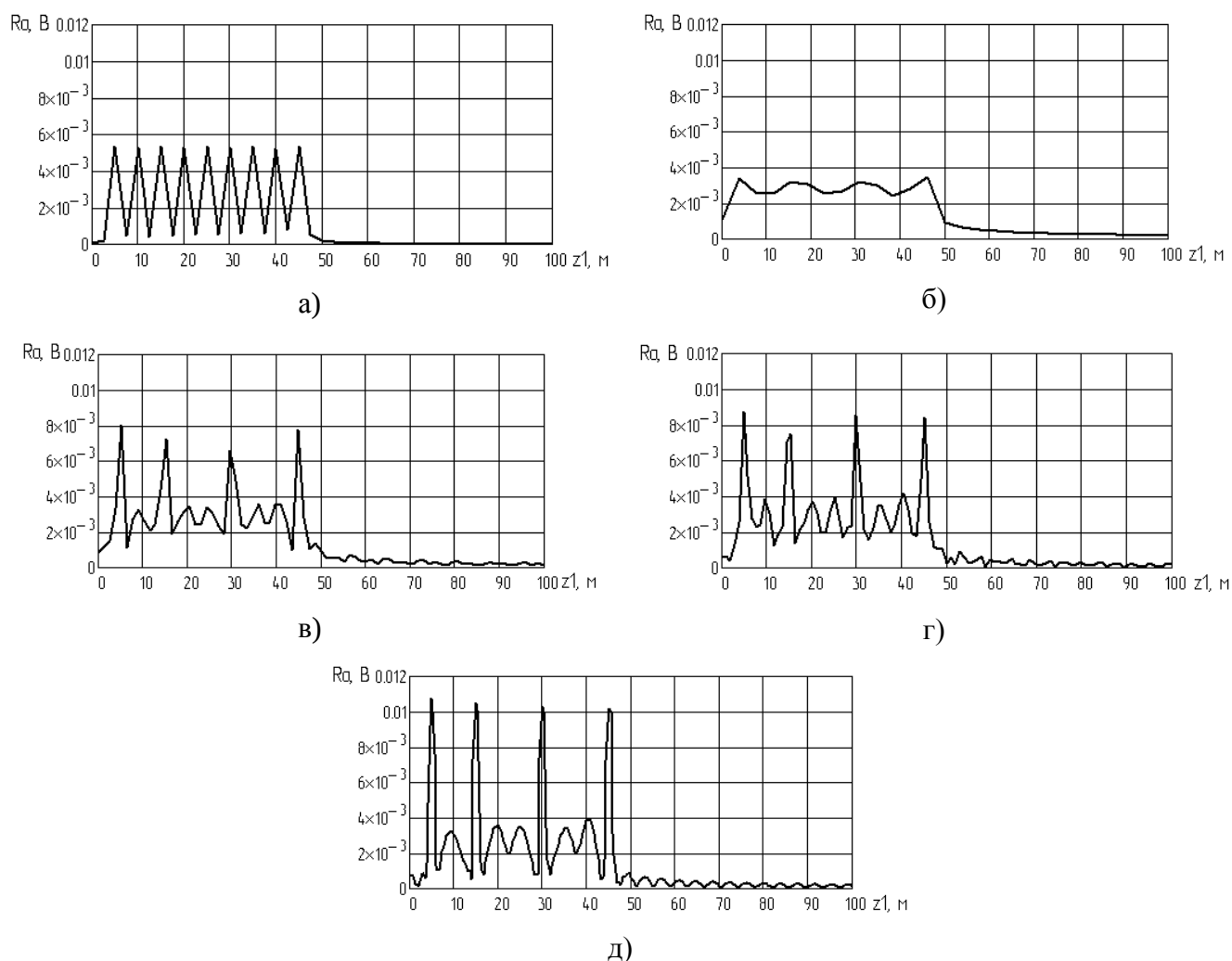


Рис. 2. Азимутальный портрет факетной модели а) при времени накопления сигнала $t_1 = 0,2$ с, б) при времени накопления сигнала $t_1 = 0,13$ с, в) в случае удлинения пачки на $t_2 = 2 \cdot t_1$, г) в случае удлинения пачки на $t_2 = 3 \cdot t_1$, д) в случае удлинения пачки на $t_2 = 10 \cdot t_1$

Из рисунка видно, что при удлинении принятой пачки сигналом, полученным на основе минимально-параметрической модели, происходит разрешение всех девяти пластин по поперечной координате. При этом интенсивность гармоник, присутствующих в минимально-параметрической модели, растет пропорционально времени накопления. А

отклики от пластин, не отмеченных в модели, остаются на прежнем уровне, их ширина возрастает, появляются боковые лепестки. Описанный эффект аналогичен эффекту, проявляющемуся в спектре сигнала, отсчеты которого были дополнены нулями [2]. Как указано в [2], ширина спектра такого сигнала будет обратно пропорциональна длительности ненулевой его части. Таким образом, чем короче будет принятая пачка импульсов, тем шире окажется разрешаемый пик в изображении.

Исходя из вышесказанного, для распознавания гармоник, не присутствующих в минимально-параметрической модели, необходимо, чтобы контрастность гармоник L не превышала некой заданной величины. Данное условие накладывает ограничение на максимальную длительность добавляемой пачки импульсов.

Опираясь на выражение (7д), можно найти соотношение интенсивностей двух гармоник ω_1 и ω_2 в спектре сигнала $S_{\Sigma l+m}$

$$\frac{I_{\omega_1}}{I_{\omega_2}} = L = \frac{t_1 + t_2}{t_1}.$$

Тогда максимальная длительность добавляемой пачки будет определяться как

$$t_{2\max} = (L - 1) \cdot t_1. \quad (13)$$

На рис. 3 приведена зависимость $t_{2\max}$ от контрастности гармоник при длительности принятой пачки t_1 , равной а) 0,13 с, б) 0,1 с, в) 0,05 с.

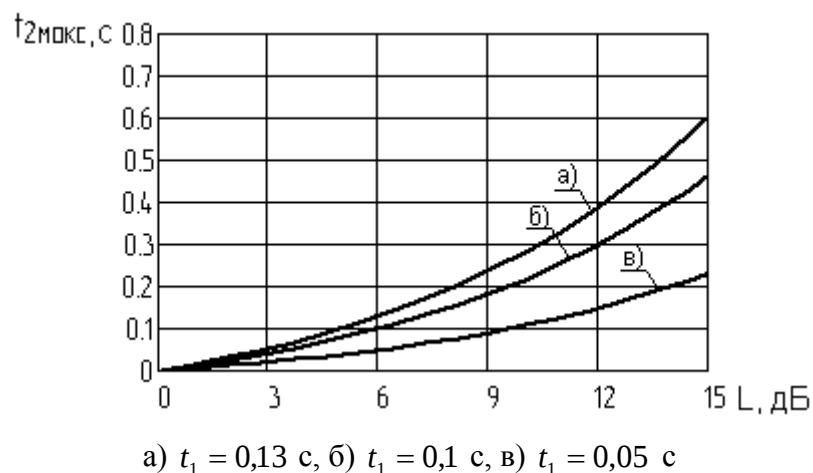


Рис. 3. Зависимость максимальной длительности добавляемой пачки от длительности принятой

Полученное в работе выражение для максимальной длительности добавляемого сигнала позволяет оценить границы применимости разработанной методики синтеза изображений высокого разрешения при возможности использования частичной априорной информации о типе и геометрии лоцируемого радиолокационного объекта на основе минимально-параметрического моделирования. Исследования показали, что данная методика позволяет повысить разрешающую способность изображения от нескольких процентов до 3-4 раз в зависимости от достигнутого энергетического потенциала радиолокационной станции.

Список использованных источников:

1. Нефедов С.И. Анализ возможности модельного удлинения когерентной пачки синтезирования для повышения разрешения радиоизображения // Радиолокация, навигация, связь: Труды XVII международной научно-технической конф. Воронеж. 2011. Т. 3. С. 2295 - 2301.
2. Марпл - мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения /Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
3. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
4. Лабунец Л.В., Анищенко Н.Н., Яруллин А.Р. Математическое моделирование переходных характеристик 3D- объектов в радиолокационной системе ближнего действия // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 3, С. 279-302.
5. Борзов А.Б., Соколов А.В., Сучков В.Б. Цифровое моделирование входных сигналов систем ближней радиолокации от сложных радиолокационных схем // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. №9-10. С. 38-62.
6. Орлов В.М., Шустиков В.Ю., Юсова Ю.С. Разработка и анализ алгоритма построения радиоизображений целей для наземной когерентной радиолокационной станции // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. Спец. выпуск. 2009. С.116-123.

The method of enhancement ISAR image resolution on basis of modeling lengthening coherent radar return burst

77-30569/252747

11, November 2011

Nefedov S.I.

Bauman Moscow State Technical University

nefedov@bmstu.ru

The author proposes a technique for building high resolution ISAR image using prior information about type and geometry of the target based on minimal-parametric simulation. Limits of usage are estimated and results of mathematical simulation are given.

Publications with keywords: [isar image](#), [minimal-parametric modelling](#), [coherent pulse burst](#)

Publications with words: [isar image](#), [minimal-parametric modelling](#), [coherent pulse burst](#)

Reference:

- 1.Nefedov S.I., in: Proceedings of XVII international scientific and technical conference on Radiolocation, Navigation and Communication, Voronezh, Vol.3, 2011, pp. 2295-2301.
- 2.Marple, jr. S.L., Digital spectral analysis and its applications, Moscow, Mir, 1990, 584 p.
- 3.Laions R., Digital signal processing, Moscow, OOO «Binom-Press», 2006, 656 p.
- 4.Labunets L.V., Anishchenko N.N., Iarullin A.R., Radiotekhnika i elektronika 51 (3) (2006) 279-302.
- 5.Borzov A.B., Sokolov A.V., Suchkov V.B., Uspekhi sovremennoi radioelektroniki 9-10 (2004) 38-62.
- 6.Orlov V.M., Shustikov V.Iu., Iusova Iu.S., Vestnik MGTU. Ser. Priborostroenie - Bulletin of BMSTU. Ser. Instrumentation Special issue (2009) 116-123.