

А. В. КСЕНДЗУК, В. Ф. ФАТЕЕВ, С. А. ПОПОВ

**МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В КОСМИЧЕСКИХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
С СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ**

Представлен метод совместной обработки сигналов в многопозиционной радиолокационной системе с синтезированием апертуры антенны, основанной на использовании малых космических аппаратов. Приведены основные соотношения и результаты моделирования обработки в многопозиционных системах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, многопозиционная радиолокационная синтезированная антенна, оптимальная обработка, малые космические аппараты, радиолокационное изображение.

Использование малых космических аппаратов (МКА) позволяет перейти на качественно новый уровень решения задач дистанционного зондирования за счет развертывания космической многопозиционной системы мониторинга земной поверхности [1—4]. Такая система должна состоять из приемников и передатчиков, способных осуществлять совместную обработку отраженных от объектов электромагнитных полей (рис. 1, здесь ПРД — передатчик, ПРМ — приемник). Технологическая повторяемость обуславливает относительно невысокую стоимость создания и развертывания такой многопозиционной (МП) радиолокационной синтезированной антенны (РСА).

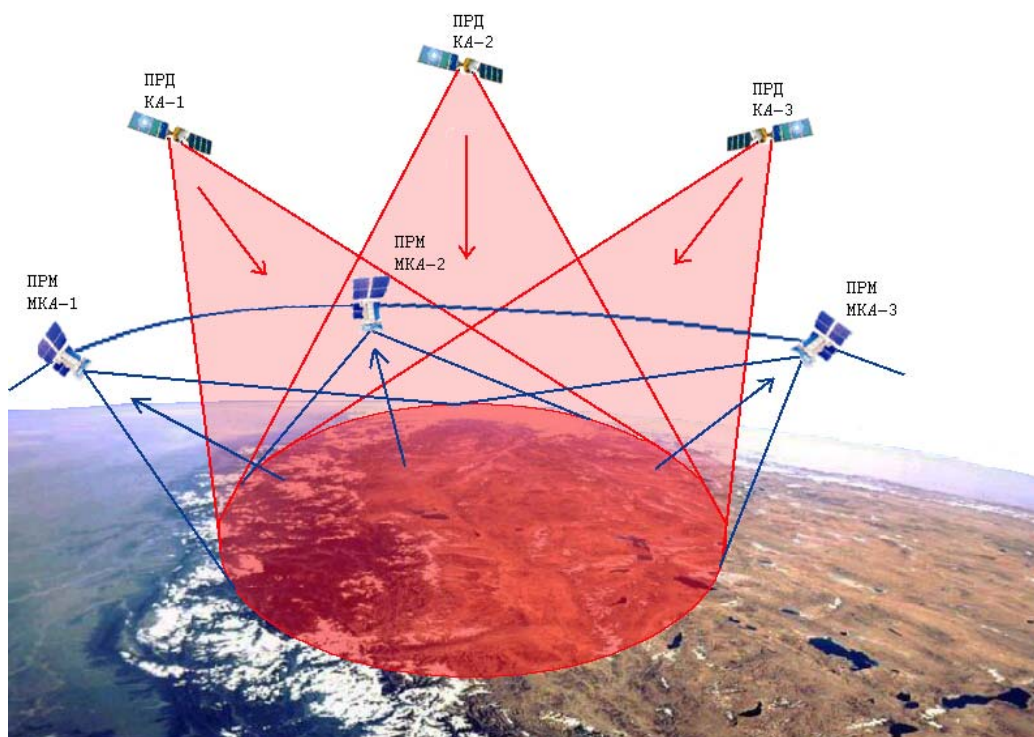


Рис. 1

Одной из основных задач при создании этой системы является разработка методов совместной обработки наблюдаемых полей, что позволит достичь наилучшего качества получаемых данных.

Методы формирования радиолокационного изображения в системах дистанционных исследований могут основываться на двух основных моделях отраженных от поверхности сигналов — стохастической и функционально-детерминированной. Эти модели базируются на представлении комплексного коэффициента отражения от объектов $\dot{F}(\mathbf{r})$, входящего в уравнение отраженного (рассеянного) сигнала в виде функционально-детерминированного или стохастического пространственного процесса [4].

Получим соотношения для оптимальной совместной обработки сигнала в многопозиционной системе с синтезированием апертуры антенны для аддитивной модели уравнения наблюдения, где первый статистический момент $\mathbf{u}(t)$ зависит от комплексного коэффициента отражения $\dot{F}(t, \mathbf{r})$, который можно представить в рамках функционально-детерминированных моделей. Оптимальные оценки вектора искомых функций λ (электрофизических параметров поверхности как функций координат \mathbf{r} и времени t) определяются из решения вариационного уравнения

$$\int_0^T \int_0^T \frac{\delta \mathbf{m}_u^T(t_1, \lambda)}{\delta \lambda} \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) [\mathbf{u}(t_2) - \mathbf{m}_u(t_2, \lambda)] dt_1 dt_2 + \int_0^T \int_0^T [\mathbf{u}^T(t_1) - \mathbf{m}_u^T(t_2, \lambda)] \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \mathbf{m}_u(t_2, \lambda)}{\delta \lambda} dt_1 dt_2 = 0, \quad (1)$$

где $\delta/\delta(\cdot)$ — вариационная производная, $\mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2)$ — обратно-корреляционная функция наблюдаемого процесса $\mathbf{u}(t)$ со средним \mathbf{m} .

Когда вектор аддитивных помех $\mathbf{n}(t)$ является нестационарным процессом со средним $\mathbf{m}(t) = \boldsymbol{\beta}(t)$, он представляет собой равенство результата обработки входного сигнала в соответствии с соотношением (1)

$$\int_0^T \int_0^T \left[\frac{\delta \mathbf{S}_D^T(t_1, \lambda)}{\delta \lambda} \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \mathbf{u}(t_2) + \mathbf{u}^T(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \mathbf{S}_D(t_2, \lambda)}{\delta \lambda} \right] dt_1 dt_2, \quad (2)$$

где $\mathbf{S}_D(t, \lambda)$ — вектор сигналов, отраженных от всей области поверхности

$$\int_0^T \int_0^T \left[\frac{\delta \mathbf{S}_D^T(t_1, \lambda)}{\delta \lambda} \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \mathbf{S}_D(t_2, \lambda) + \mathbf{S}_D^T(t_1, \lambda) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \mathbf{S}_D(t_2, \lambda)}{\delta \lambda} \right] dt_1 dt_2, \quad (3)$$

и смещения

$$b(\mathbf{r}) = \int_0^T \int_0^T \left[\frac{\delta \mathbf{S}_D^T(t_1, \lambda)}{\delta \lambda} \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \boldsymbol{\beta}(t_2) + \boldsymbol{\beta}^T(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \mathbf{S}_D(t_2, \lambda)}{\delta \lambda} \right] dt_1 dt_2. \quad (4)$$

Для большинства практически важных случаев справедливо предположение о стационарности $\mathbf{n}(t)$, по крайней мере, на интервале синтеза апертуры антенны. При этом оптимальный алгоритм определяется из равенства, левая часть которого имеет вид

$$\text{Re} \int_0^T \int_0^T \left[\frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D^T(t_1, \lambda)}{\delta \lambda} \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \mathbf{u}(t_2) + \mathbf{u}^T(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D(t_2, \lambda)}{\delta \lambda} \right] dt_1 dt_2. \quad (5)$$

Правая часть при условии узкополосности спектра сигнала многопозиционной системы, а именно при выполнении для произвольных комбинаций несущих частот условия

$$\max_{k,m} |f_{0k} - f_{0m}| + 2\Delta F < \min_{k,m} |f_{0k} + f_{0m}|, \quad (6)$$

может быть записана так:

$$\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^T \int_0^T \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D^T(t_1, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} \mathbf{R}^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_D^*(t_2, \boldsymbol{\lambda}) dt_1 dt_2 + \int_0^T \int_0^T \dot{\mathbf{S}}_D^{T*}(t_1, \boldsymbol{\lambda}) \mathbf{R}^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D(t_2, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} dt_1 dt_2 \right). \quad (7)$$

Для определения процедуры комплексирования используем решение, учитывающее мнимые части выражений (5) и (7):

$$\int_0^T \int_0^T \left[\frac{\delta \mathbf{S}_D^T(t_1, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \mathbf{u}(t_2) + \mathbf{u}^T(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \mathbf{S}_D(t_2, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} \right] dt_1 dt_2 = \\ = \frac{1}{2} \left(\int_0^T \int_0^T \frac{\delta \mathbf{S}_D^T(t_1, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_D^*(t_2, \boldsymbol{\lambda}) dt_1 dt_2 + \int_0^T \int_0^T \dot{\mathbf{S}}_D^{T*}(t_1, \boldsymbol{\lambda}) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D(t_2, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} dt_1 dt_2 \right). \quad (8)$$

В случае симметрии функции $\mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2)$ относительно транспонирования и перестановки координат ее элементов выражение (8) упрощается до

$$\int_0^T \int_0^T \mathbf{u}^T(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D(t_2, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} dt_1 dt_2 = \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \dot{\mathbf{S}}_D^{T*}(t_1, \boldsymbol{\lambda}) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D(t_2, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} dt_1 dt_2, \quad (9)$$

вырожденная форма которого является классическим уравнением для оптимальных оценок в РСА [6]:

$$\int_0^T \int_0^T \mathbf{u}(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \mathbf{S}_D(t_2, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} dt_1 dt_2 = \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \dot{\mathbf{S}}_D^*(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_D(t_2, \boldsymbol{\lambda})}{\delta \boldsymbol{\lambda}} dt_1 dt_2. \quad (10)$$

Дальнейшее уточнение процедуры совместной обработки в МП РСА необходимо проводить с учетом (10) на основании моделей сигнала и электродинамической модели поверхности [4].

В качестве модели сигнала будем использовать вектор, координаты которого можно представить в форме

$$\dot{\mathbf{S}}_{Di}(t) = \operatorname{Re} \int_D \dot{\mathbf{F}}[t, \mathbf{r}; \boldsymbol{\lambda}(t, \mathbf{r})] \dot{\mathbf{S}}(t, \mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

где ядро $\dot{\mathbf{S}}(\cdot)$ определяется параметрами излучаемых сигналов и геометрией наблюдения.

Пусть модель поверхности представима в виде ряда

$$\dot{\mathbf{F}} = \xi[\boldsymbol{\lambda}(t, \mathbf{r})] \sum_{l=1, \dots, L} \eta_l[\boldsymbol{\gamma}(t, \mathbf{r}), \boldsymbol{\Theta}(t, \mathbf{r})], \quad (11)$$

где ξ — функция комплексирования; η — базисные функции; $\boldsymbol{\lambda}(t, \mathbf{r})$ — вектор параметров комплексирования; $\boldsymbol{\gamma}(t, \mathbf{r})$ — вектор несущественных параметров, $\boldsymbol{\Theta}(t, \mathbf{r})$ — вектор электрофизических параметров поверхности.

При этом уравнение для оптимальных оценок (10) примет вид:

$$\int_0^T \int_0^T \mathbf{u}^T(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_{\lambda}(t_2, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}) dt_1 dt_2 = \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \int_D \xi^*[\boldsymbol{\lambda}(t_1, \mathbf{r})] \times \\ \times \dot{\mathbf{S}}_{\lambda}^{T*}(t_1, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_{\lambda}(t_2, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_1) dt_1 dt_2 d\mathbf{r}_1, \quad (12)$$

где

$$\dot{\mathbf{S}}_{\lambda_i}(t, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}) = \sum_{k=1, \dots, Tr} \sum_{l=1, \dots, L} \eta_l[t, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}, \boldsymbol{\Theta}_{ik}(t, \mathbf{r})] \dot{\mathbf{S}}_{ik}(t, \mathbf{r})$$

— координаты модифицированного (с учетом модели поверхности) вектора опорных сигналов.

Для статической во временной области модели $\xi(t, \mathbf{r})$ выражение (12) упростится:

$$\int_0^T \int_0^T \mathbf{u}^T(t_1) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_\lambda^*(t_2, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_1) dt_1 dt_2 = \frac{1}{2} \int_D \xi[\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})] \int_0^T \int_0^T \dot{\mathbf{S}}_\lambda^T(t_1, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}) \times \times \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_\lambda^*(t_2, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_1) dt_1 dt_2 d\mathbf{r}. \quad (13)$$

Правая часть уравнения (13) содержит модифицированную пространственную функцию неопределенности Ψ_λ (ПФН) для вектора функции с учетом модели (11)

$$\Psi_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \int_0^T \int_0^T \dot{\mathbf{S}}_\lambda^T(t_1, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}) \mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_\lambda^*(t_2, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_1) dt_1 dt_2, \quad (14)$$

которая может быть представлена в виде суммы ПФН по всем комбинациям приемников:

$$\dot{\Psi}_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \sum_{i,j=1, \dots, Rc} \dot{\Psi}_{\lambda_{ij}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \sum_{i,j=1, \dots, Rc} \int_0^T \int_0^T \dot{\mathbf{S}}_{\lambda_i}^T(t_1, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}) R_{ij}^{-1}(t_1, t_2) \dot{\mathbf{S}}_{\lambda_j}^*(t_2, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_1) dt_1 dt_2.$$

Левая часть равенства (13) содержит в себе операции декорреляции входного векторного процесса $\mathbf{u}^T(t)$ матрицей $\mathbf{R}_u^{-1}(t_1, t_2)$ и последующую согласованную фильтрацию с модифицированным опорным сигналом $\dot{\mathbf{S}}_\lambda^*(t_2, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{r}_1)$.

Особенностью разработанных алгоритмов является оценка не вектора $\boldsymbol{\lambda}(t, \mathbf{r})$, а связанных с ним функции комплексирования $\xi[\boldsymbol{\lambda}(t, \mathbf{r})]$. Задача определения $\xi[\boldsymbol{\lambda}(t, \mathbf{r})]$ является обратной и в общем случае некорректной [6]. Однако в соответствии с общепринятой практикой [7] в качестве оптимальных оценок параметров можно принять сглаженный функцией неопределенности результат совместной обработки входного процесса.

При известных априорных значениях плотности распределения вероятности векторов оцениваемых параметров оптимальные оценки определим в рамках метода максимальной апостериорной плотности вероятности путем решения уравнения [7]

$$\frac{\delta \int p(\boldsymbol{\lambda}) d\boldsymbol{\lambda}}{\delta \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})} \int_U l[W(\mathbf{u}), \boldsymbol{\lambda}] p(\mathbf{u} / \boldsymbol{\lambda}) d\mathbf{u} = - \int_\Lambda p(\boldsymbol{\lambda}) d\boldsymbol{\lambda} \frac{\delta \int l[W(\mathbf{u}), \boldsymbol{\lambda}] p[\mathbf{u} / \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})] d\mathbf{u}}{\delta \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})}. \quad (15)$$

В случае аппроксимации плотности вероятности оцениваемого параметра гауссовым распределением оптимальные оценки находятся из уравнения

$$\frac{\delta}{\delta \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})} [-\ln(C) + \frac{1}{2} \int_D \int_D [\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r}_1) - \mathbf{m}_\lambda(\mathbf{r}_1)]^T \mathbf{R}_\lambda^{-1}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \times \times [\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r}_2) - \mathbf{m}_\lambda(\mathbf{r}_2)] d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2] = \frac{\delta \ln \{p[\mathbf{u} / \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})]\}}{\delta \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})}, \quad (16)$$

где $\mathbf{R}_\lambda(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ — второй статистический момент распределения $\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})$.

В качестве примера на рис. 2 приведены оценки удельной эффективной поверхности рассеяния σ (l), сформированные в однопозиционной РСА (2) и МП РСА, состоящей из трех (3) и четырех (4) приемопередатчиков, а также соответствующие отношения сигнал/помеха (μ). Представленные результаты получены в ходе имитационного моделирования на основе оптимальной обработки сигналов при использовании принципов, описанных в работах [5, 8].

Моделирование выполнялось при использовании данных экспериментальных исследований характеристик отраженных сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS, проведенных в МАК „Вымпел“. В качестве исходных данных использовались параметры группировки навигационных спутников и экспериментально измеренный уровень отраженного от объектов навигационного сигнала относительно уровня прямого сигнала. На рис. 3 приведены

результаты определения относительной мощности по двум навигационным спутникам 13 ГЛОНАСС (1) и 26 GPS (2). Справа — созвездие наблюдаемых навигационных спутников.

Исследование оптимальных алгоритмов в зависимости от пространственной конфигурации, характера перемещения элементов МП РСА, несущих частот, вида используемых сигналов позволяет получить соответствующие значения предельных погрешностей измерений и пространственных функций неопределенности и таким образом обеспечить оптимальное планирование эксперимента дистанционного зондирования с целью получения наилучшего качества результатов.

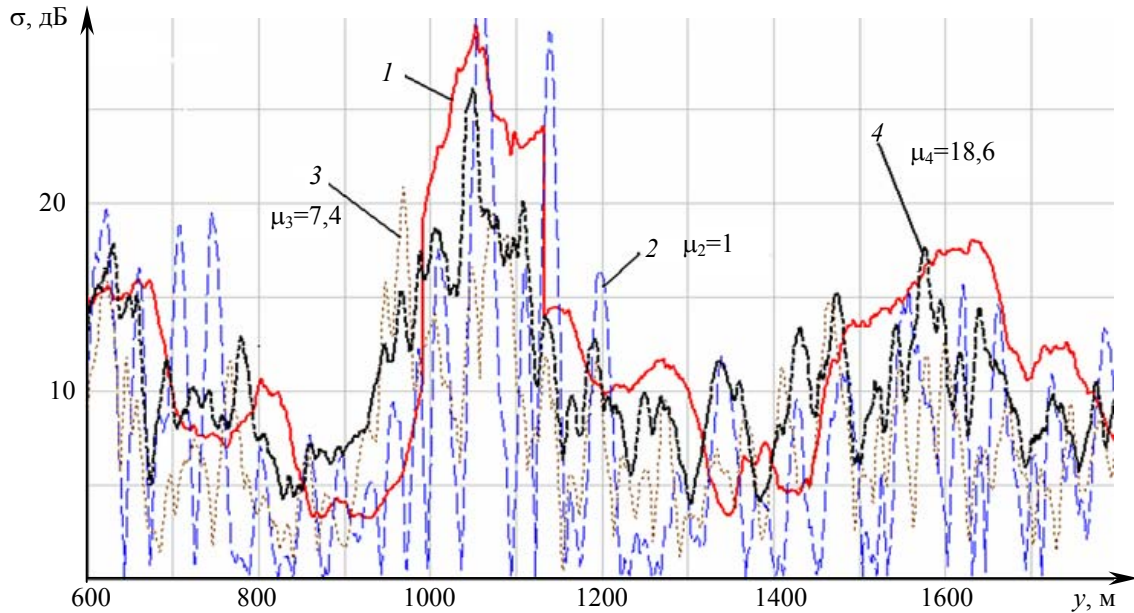


Рис. 2

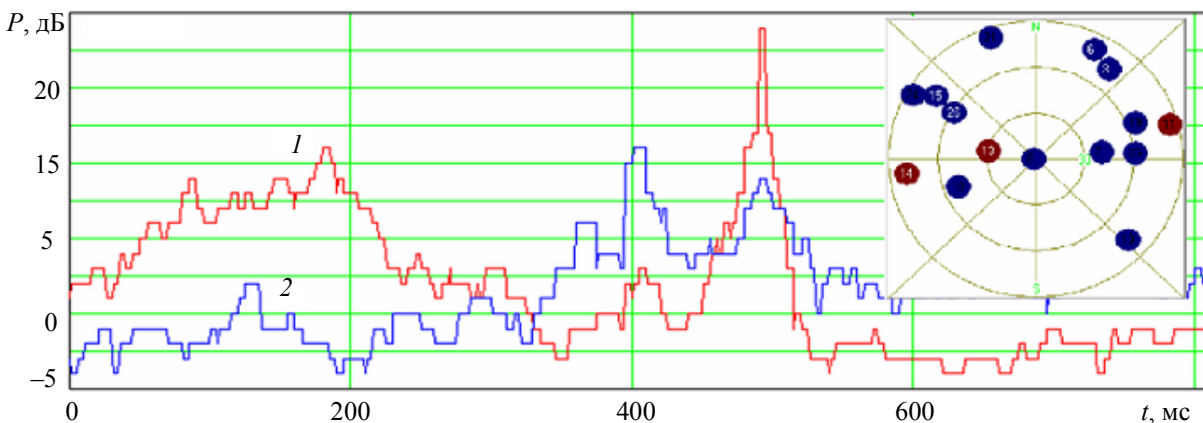


Рис. 3

Полученные алгоритмы оптимальной обработки могут служить основой для создания различных квазиоптимальных алгоритмов, применимых при отсутствии необходимой априорной информации и/или при необходимости обеспечения измерений в масштабе реального времени. Такие алгоритмы будут обеспечивать меньшее отношение сигнал/помеха, чем оптимальный, но тем не менее существенно уменьшать уровень спекл-шума и повышать качество радиолокационных изображений по отношению к моностатическим РСА. Более того, как показывают исследования, полученные алгоритмы более устойчивы к различным помехам, а также к неточности определения исходных параметров модели поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев В. Ф., Сахно И. В. Применение навигационных КА GPS/ГЛОНАСС в составе многопозиционных РЛС обзора земной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 3. С. 27—31.
2. Фатеев В. Ф., Сахно И. В. Бортовая итерферометрическая многопозиционная система радиолокационного обзора Земли, использующая сигналы навигационных КА ГЛОНАСС/GPS/GALILEO // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 6. С. 11—17.
3. Патент № 2278398 РФ. Способ получения радиолокационного изображения земной поверхности при помощи многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны / И. В. Сахно, В. Ф. Фатеев. 05.06.2004.
4. Ксендзук А. В. Энергетический потенциал ГЛОНАСС/GPS для решения задач ДЗ // Тез. докл. III науч.-практич. конф. „Применение спутниковых радионавигационных систем (GNSS) в Украине“. 2002. С. 123—126.
5. Ксендзук А. В., Волосяк В. К., Зеленский А. А., и др. Цифровая обработка сигналов и изображений / Под ред. В. Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2007. 544 с.
6. Волосяк В. К. Физические основы дистанционного зондирования природных сред радиотехническими средствами аэрокосмического базирования. Харьков: Харьковский авиац. ин-т, 1997.
7. Фалькович С. Е., Волосяк В. К., Горбуненко О. А. Радиотехнические системы дистанционного зондирования. Харьков: Харьковский авиац. ин-т, 2002.
8. Ksendzук A. V., Volosyuk V. K., Sologub N. S. Modeling SAR primary and secondary processing algorithms. Estimating quality of the processing techniques // 5th Europ. Conf. on Synthetic Aperture Radar EUSAR 2004. Ulm, Germany. 2004. Vol. 2. P. 1013—1016.

Сведения об авторах

- Александр Владимирович Ксендзук** — д-р техн. наук; ОАО МАК „Вымпел“, кафедра информационных систем, Москва; E-mail: ks_alex@mail.ru
- Вячеслав Филиппович Фатеев** — д-р техн. наук, профессор; президент ОАО МАК „Вымпел“, кафедра информационных систем, Москва; E-mail: vimpel@vimpel.ru
- Сергей Алексеевич Попов** — канд. техн. наук; ОАО МАК „Вымпел“, кафедра информационных систем, Москва; E-mail: ks_alex@mail.ru

Рекомендована Ученым советом
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
20.10.08 г.