

Детальный РСА интерферометр для подповерхностного мониторинга при археологических исследованиях

М.И. Бабокин, А.В. Ефимов

АО «Аэрокон», 140187, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1.

E-mail: m.baboki@hotmail.ru; alexef73@mail.ru

Представлен вариант использования космического однопроходного РСА интерферометра для обнаружения различных подповерхностных геологических неоднородностей.

Приведены практические результаты использования информационных возможностей фазового портрета при археологических исследованиях.

A variant of using a space single-pass SAR interferometer for detecting various subsurface geological inhomogeneities is presented. Practical results of using the information capabilities of the phase portrait in archaeological research are presented.

Введение

В настоящее время интерферометрический мониторинг Земли рассматривается как один из основных способов целевого применения современных космических радиолокационных комплексов (РЛК), существенным образом увеличивающий их информативность за счет использования фазы как носителя полезной информации [1–3,11,12]. Известно, что в своей основе интерферометрический мониторинг позволяет анализировать различные изменения земной поверхности и выявлять даже незначительные деформации грунта. Такие данные сегодня уже доступны многим потребителям при использовании различных интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой (InSAR) [9,10].

Необходимым условием успешной интерферометрической обработки является обеспечение взаимной когерентности, по крайней мере, пары радиолокационных изображений одного и того же участка местности, полученных при разных ракурсах наблюдения или на разных частотах [1,2,4,5]. Для этого должен быть выполнен ряд условий по стабильности характеристик излучаемого зондирующего сигнала, геометрии радиолокационной съемки, постоянству параметров среды распространения зондирующего сигнала и отражающей подстилающей поверхности (минимизация временной декорреляции данных).

Кроме того, уровень когерентности (корреляции) интерферометрических данных непосредственно зависит от выбора диапазона рабочих частот. С увеличением длины волны начинаются изменения характера отражения от земной поверхности.

Короткие волны подвержены серьезным искажениям и потерям при распространении и не обеспечивают выполнения требований большой дальности наблюдения и независимости от погодных условий.

Цель работы: обосновать выбор диапазона рабочих частот однопроходного РСА интерферометра для решения практических задач по обнаружению и распознаванию различных геологических неоднородностей на основе использования возможностей фазового портрета.

Специфика подповерхностного мониторинга

Известно [1–3], что электромагнитные волны (ЭМВ) хорошо рассеиваются объектами, геометрические размеры которых сопоставимы с их длиной. Если размеры объектов меньше, чем длина волны, наблюдается интерференция, а если объект больше длины волны, начинает преобладать отражение сигнала от частей объекта.

При интерферометрических исследованиях (оценка рельефа местности, обнаружение подвижек поверхности и т.п.) необходимо уделять особое внимание выделению рассеяния от мелкоструктурных поверхностей (степь, пашня и т.п.), которое имеет диффузный характер. Другой особенностью вклада этих компонентов в общую структуру отражений является то, что их удельная эффективная площадь рассеивания (ЭПР) резко падает при увеличении длины волны (см. рис. 1).

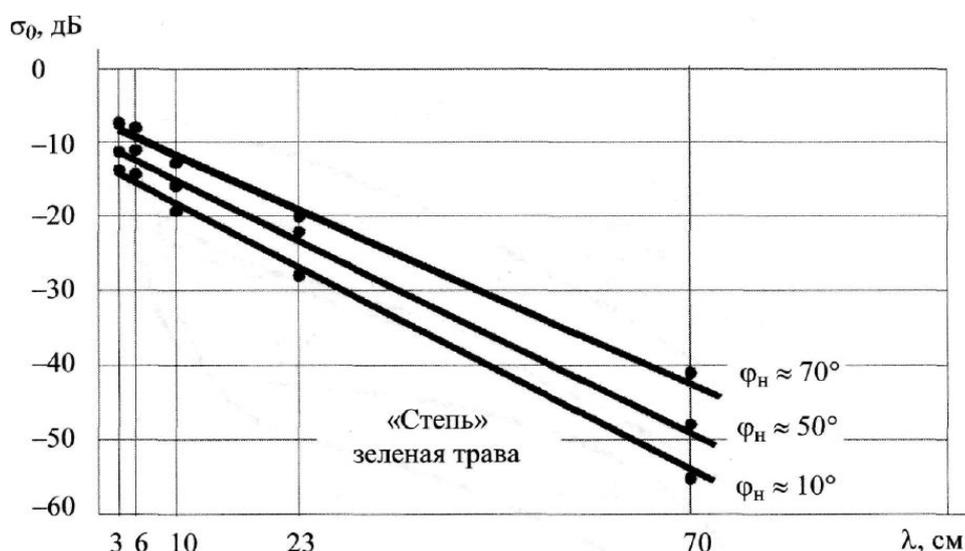


Рис. 1. Зависимость удельной ЭПР поверхности от длины волны при разных углах скольжения

Тем более, что при формировании детального РЛИ уровень сигнала отраженного от поверхности продолжает падать при уменьшении разрешающей способности, поскольку её ЭПР определяется следующим образом: $\sigma \approx \sigma_0 \delta x \delta y$, где δx – разрешающая способность по азимуту, δy – разрешающая способность по дальности.

Возникает некоторый парадокс: чем больше длина волны и выше детальность РЛИ, тем меньше уровень отражений от земной поверхности или от протяжённых объектов. Хорошо проявляются границы протяжённых объектов, отражатели, размеры которых сопоставимы с элементом разрешения, но собственно сигнала от поверхности и протяжённых объектов всё меньше и меньше.

Одним из основных вопросов для археологического подповерхностного мониторинга является выбор длины волны. Как известно [2], глубина проникновения ЭМВ зависит, как от соотношения между длиной волны и неровностями земной поверхности, так от значения комплексной диэлектрической постоянной.

В большинстве случаев с достаточной для оценочных данных точностью глубина проникновения ЭМВ в однородную по составу изотропную среду может быть оценена по приближённой формуле ($\varepsilon''/\varepsilon' \ll 1$):

$$\delta_3 \approx \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\varepsilon''}, \quad (1)$$

где δ_3 – расстояние от границы раздела сред, где величина мощности ЭМВ на 4,34 дБ меньше мощности падающей волны в точке, расположенной непосредственно под поверхностью, λ – длина ЭМВ в свободном пространстве, $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \approx \varepsilon'(1 - j \cdot \text{tg}\chi)$ –

относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды, $\operatorname{tg}\chi$ – тангенс угла потерь.

Анализ выражения (1) приводит к известному выводу: чем больше длина волны, тем на большую глубину распространится ЭМВ. Однако, кроме глубины распространения нас также интересует уровень отражённого от заглублённого объекта (в большинстве своём протяжённого) сигнала. Тут мы опять приходим к тем же выводам, что и при наблюдении земной поверхности: если объект протяжённый (например, станция метро; слой с отличающейся от базовой плотностью среды и т.п.), то уровень обратных отражений резко падает при увеличении длины волны и повышении детальности РЛИ.

Эти две противоречивые особенности отражений дают основание для поиска оптимума при выборе длины волны ЭМВ при подповерхностном археологическом мониторинге.

Безусловно, для обнаружения отдельных "точечных" объектов естественного и искусственного происхождения, границ раздела сред и т.п., предпочтение отдаётся длинноволновому диапазону от L до P (более длинные волны рассматривать нецелесообразно из-за габаритных ограничений космического РСА).

Для обнаружения подповерхностных наслоений или протяжённых объектов актуальными становятся волны от S до L диапазона.

В некоторых случаях для обнаружения протяжённых объектов неглубокого залегания целесообразно воспользоваться диапазоном волн от X до S.

Обоснованием целесообразности использования S диапазона волн при археологических исследованиях и будут посвящены в дальнейшем следующие рассуждения.

На рис. 2 представлена геометрическая схема, поясняющая зондирование заглублённого объекта.

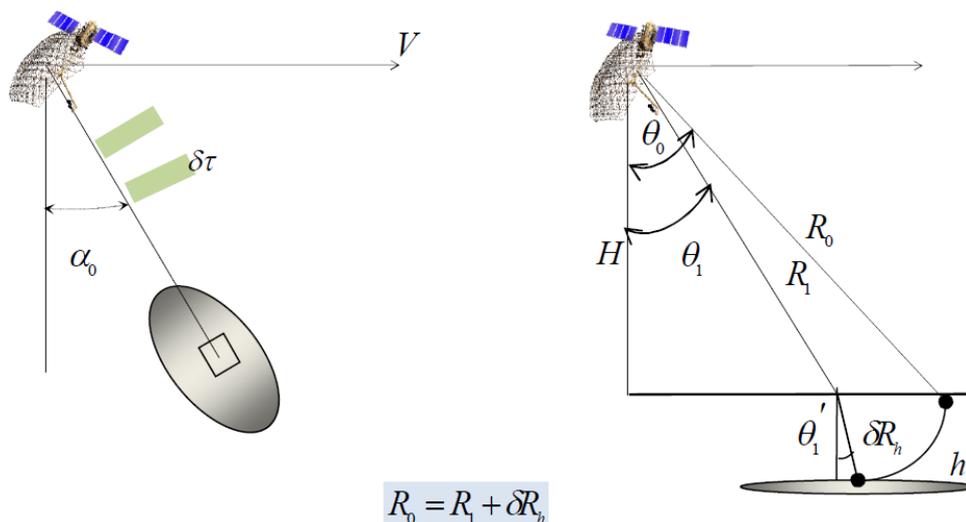


Рис. 2. Схема наблюдения заглублённого объекта

Итак, носитель РСА (космический аппарат) движется со скоростью V на высоте H . Наблюдение за участком земной поверхности на дальности R_0 осуществляется некоторое время $t = 0 \dots T_c$, T_c – время синтезирования. Луч антенны отклонён от нормали к линии пути на угол α_0 и на угол падения θ_0 (θ_1 – отклонённый на границе раздела сред угол). Локатор облучает земную поверхность импульсными сигналами с

постоянным периодом повторения T_p ; параметр h – глубина залегания объекта. В пределах относительно небольшой области поверхности, подсвечиваемой лучом РСА, кривизну земной поверхности можно не учитывать.

В [2] представлены значения составляющих диэлектрической проницаемости некоторых сред, по которым можно рассчитать глубину проникновения. Так для кварцевого песка глубина проникновения составляет $\delta_s \approx 7,5$ м, для $\lambda = 9$ см. Гранит имеет расчётную глубину $\delta_s \approx 0,6$ м, а для «сухой» глины $\delta_s \approx 24$ см.

Итак, амплитуда волны во второй среде убывает с расстоянием по сложному закону. Изменяется также и фаза волны при проникновении до объекта и обратно:

$$\Delta\varphi_{o\bar{o}}(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [V \sin(\alpha_0) \cos(\theta_0) \Delta\theta], \quad (2)$$

$$\text{при } R_0 = R_1 + \delta R_h \text{ или } \frac{H}{\cos(\theta_0)} = \frac{H}{\cos(\theta_1)} + \frac{\delta h}{\cos(\theta_1')}, \quad (3)$$

где $\frac{\cos(\theta_1')}{\cos(\theta_1)} = \frac{n_0}{n_1}$, n_0, n_1 – показатель преломления в атмосфере и в среде,

$$\Delta\theta \approx \frac{n_0}{n_1} \frac{h}{R_0 \sin(\theta_0)}, \quad (4)$$

поэтому

$$\Delta\varphi_{o\bar{o}}(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda R_0} h \frac{n_0}{n_1} V \sin(\alpha_0) \operatorname{ctg}(\theta_0) t. \quad (5)$$

Заметим, что дополнительный фазовый сдвиг имеет линейную зависимость от глубины залегания, которая при скошенном обзоре приводит к дополнительному сдвигу фазы и доплеровскому смещению.

Будем считать, что в антенну РСА поступает аддитивная смесь сигнала $s_1(t)$, отраженного от земной поверхности, и сигнала $s_2(t, h)$, полученного с определёнными потерями от заглоблённого объекта, расположенного на глубине h . Полагаем также, что при проникновении и отражении ЭМВ от заглоблённого объекта исследования поляризационных отклонений не происходит.

Для представления свойств поверхности и заглоблённого объекта воспользуемся функцией радиолокационного рассеяния (РЛР) [7] объектов исследования: $\mathbf{e}_{1mn}, \mathbf{e}_{2mn}$, представляемые в виде дискретных матриц, где каждый m, n -й элемент определяется как среднее на площадке пространственного разбиения размером в элемент разрешения $\delta x, \delta y$ (в направлении вдоль линии визирования и в ортогональном направлении).

На выходе приёмника РЛС получим наблюдаемый сигнал, который можно записать в виде:

$$\xi(t) = s_1(t) + s_2(t, h) + n(t), \quad (6)$$

где $n(t)$ – мешающий шум (белый гауссовский со спектральной плотностью N_0).

$$\mathbf{s}_{1m}(t) = \hat{g}(t) \sum_n \mathbf{e}_{1mn} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} r_m(t) \right) \right\}, \quad \mathbf{s}_{2m}(t) = \hat{g}'(t) \sum_n \mathbf{e}_{2mn} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} r'_m(t) \right) \right\},$$

$\hat{g}(t)$ – множитель, учитывающий энергетические возможности РСА и изменения в зависимости от времени и типа обзора относительно центра карты, $\hat{g}'(t)$ – учитывает потери при проникновении через границу земной поверхности и почвы до заглублённого объекта.

Сделаем некоторые преобразования:

$$\xi_1(t) = s_\Sigma(t) + n(t), \quad (7)$$

где

$$s_\Sigma(t) = \hat{g}(t) \sum_n \mathbf{e}_{\Sigma mn}(t) \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} r_m(t) \right) \right\},$$

$$\mathbf{e}_{\Sigma mn}(t) = \mathbf{e}_{1mn} \hat{g}(t) + \mathbf{e}_{2mn} \hat{g}'(t) \exp \left\{ j \left(\frac{4\pi}{\lambda} \delta r_m(t) \right) \right\},$$

$$\delta r_m(t) \approx h \left(\frac{n_0}{n_1} \right) \frac{V \sin(\alpha_0) \operatorname{ctg}(\theta_0)}{r_m} V t. \quad (8)$$

Через определенный интервал $B_0 = VT_0$ (доли интервала синтезирования) возобновляется новый сеанс съемки одного и того же участка местности. Во втором сеансе наблюдения значения углов α_0, θ_m , практически не изменяются, среда распространения тоже неизменна:

$$\xi_2(t) = s_\Sigma(t + T_0) + n(t + T_0). \quad (9)$$

Отметим тот факт, что основой фазового мониторинга является поэлементное или групповое выделение фазовых отклонений и определение участков подповерхностного залегания со значительным эффективным поверхностным отражением.

Общий вариант квазиоптимального по критерию минимума СКО алгоритма оценивания многопозиционного комплекса РСА в приложении к задачам оценивания местного рельефа был представлен в [4,5]. Оценка глубины залегания подобна оценке рельефа, поэтому воспользуемся уже сформированным алгоритмическим аппаратом.

Экспериментальная проверка работоспособности РСА интерферометра

В представляемой работе ставится задача оценки смещения разности фаз от обратного рельефа (залегания) с потерями и при наличии «мешающего» сигнала от земной поверхности:

$$\Phi = \arg \left\{ \hat{\mathbf{e}}_\Sigma(0) \hat{\mathbf{e}}_\Sigma(T_0)^T \right\}, \quad (10)$$

где $\hat{\mathbf{e}}_\Sigma(0)$ – комплексная оценка РЛР сигнала в первом сеансе, $\hat{\mathbf{e}}_\Sigma(T_0)$ – комплексная оценка РЛР сигнала во втором сеансе.

Заметим, что при оценке разности фаз в двух сеансах присутствует только один неслучайный фазовый сдвиг:

$$\delta\varphi_h \approx \frac{4\pi}{\lambda} h \left(\frac{n_0}{n_1} \right) \frac{\sin(\alpha_0) \operatorname{ctg}(\theta_0)}{r_m} VT_0, \quad (11)$$

величина которого пропорциональна глубине залегания объекта.
Откуда оценка глубины залегания:

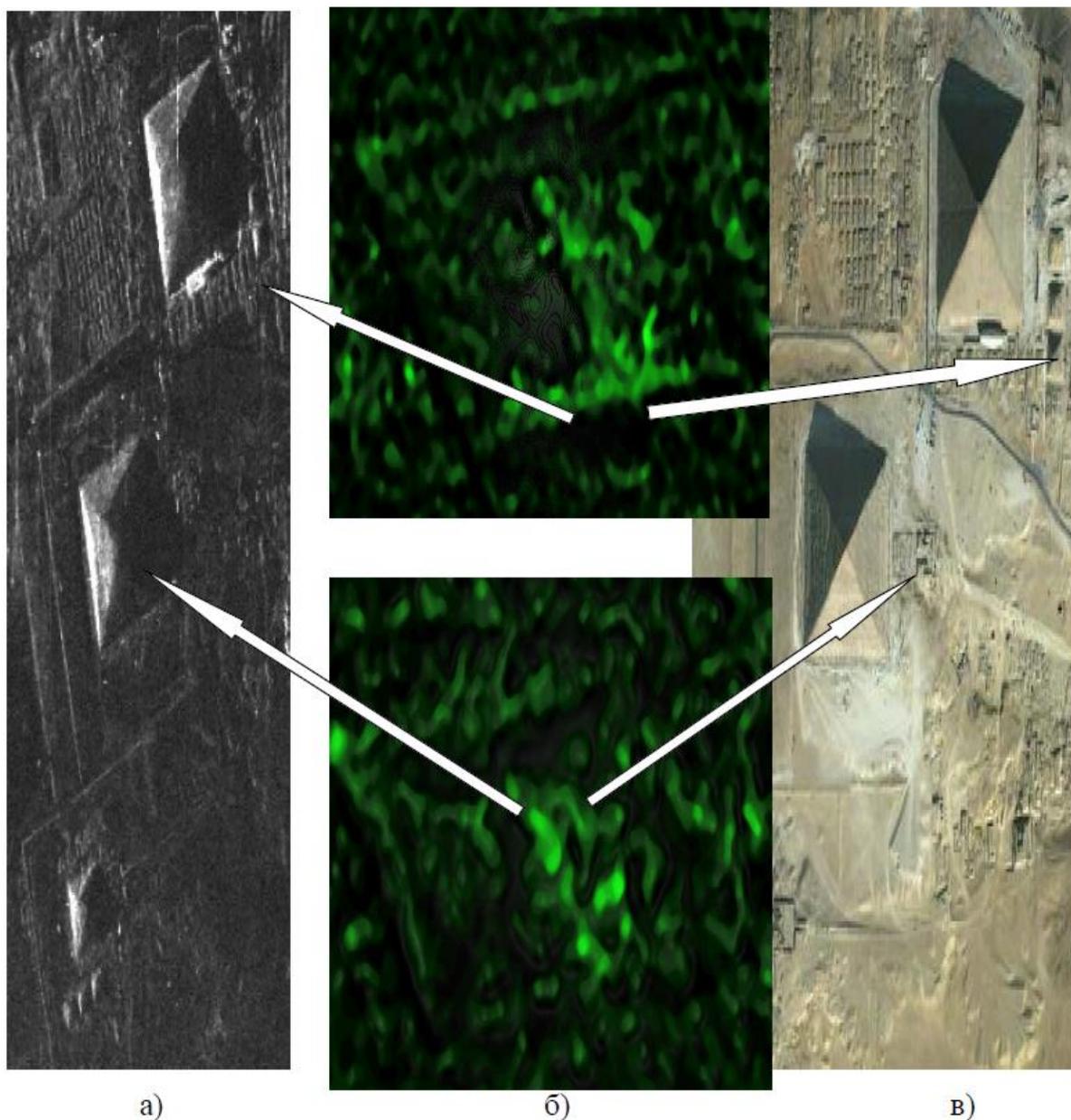
$$\hat{h}_{mm} = \frac{r_m \lambda}{\left(\frac{n_0}{n_1} \right) 4\pi \sin(\alpha_0) \operatorname{ctg}(\theta_0) VT_0} \arg \left\{ \hat{\mathbf{e}}_\Sigma(0) \hat{\mathbf{e}}_\Sigma(T_0)^T \right\}. \quad (12)$$

В качестве примера работоспособности представленных выше алгоритмов для получения фазового портрета был взят известный археологический комплекс, состоящий из 3 пирамид (Хеопса, Хефрена и Микерина), расположенных на плато Гиза на западном берегу реки Нил в пригороде Каира (Египет).

Так, например, при глубине залегания объекта порядка 1 метра (здесь $h = 1 \dots 3$ м, $\alpha_0 = 10^\circ$, $r_m = 532$ км, $\theta_m = 20^\circ$, $VT_0 = 4$ км, $\lambda = 9$ см (схема наблюдения заглубленного объекта представлена на рис. 2) фазовое отклонение будет составлять порядка $\delta\varphi_h \approx 20 \dots 60^\circ$ [5].

Радиолокационное изображение всего комплекса пирамид плато Гизы и его фазовый портрет (в центре), а также его оптическое изображение представлены соответственно на рис. 3а,б,в.

Яркость фазового портрета соответствует оцененной глубине залегания подповерхностного протяжённого объекта или уплотненного слоя.



**Рис. 3. Схема наблюдения комплекса пирамид на плато Гиза (Египет):
 а – радиолокационное изображение комплекса пирамид, б – фазовый портрет
 комплекса пирамид, в – изображение комплекса пирамид в оптическом диапазоне длин
 волн**

Особенно хотелось бы отметить верхний фрагмент (пирамида Хеопса), где фазовые аномалии (глубина залегания) пришлись именно по центру от главного входа, до “пожарного выхода”, между которыми и были расположены внутренние помещения со сложной надкомнатной защитой. Трудно представить, что проникновение было столь глубоким, но верхние сложные инженерные сооружения вполне могли повлиять на отражённый радиосигнал.

На РЛИ это не проявляется, но интерферометр предоставляет фазовую информацию, которая способна существенно расширить возможности археологических исследований.

Выводы

При подповерхностном мониторинге различных типов археологических объектов с использованием техники однопроходной РСА интерферометрии необходимо предварительно провести выбор оптимального диапазона ЭМВ в зависимости от характера материала исследуемого объекта и глубины его залегания.

На сегодняшний день требуется разработка технологии автоматического распознавания (дешифрирования) получаемых изображений геологических неоднородностей на основе фазовых портретов.

Использование технологии получения фазовых портретов в интерферометрических РСА, помимо археологических исследований, позволит также получать уникальные индивидуальные решения для оперативного мониторинга различных подповерхностных геофизических явлений, в таких областях, как:

- ✓ инженерная геология труднодоступных для человека мест;
- ✓ распознавание земных покровов (кадастры), измерение толщины льдов, измерение глубины пресноводных водоёмов, формирование радиолокационных изображений толщ и дна пресноводных водоёмов, определение влагосодержания почвы и обнаружение подземных водоемов;
- ✓ обнаружение разливов нефти на морской поверхности и под ней (на глубине);
- ✓ мониторинг заглублённых нефтяных трубопроводов, а также подземных линий электропередач.

Литература

1. Волосюк В.К., Кравченко А.В., Ксендзук А.В., Кутуза Б.Г. Оптимизация пространственно-временной обработки при подповерхностном картографировании на фоне мешающих отражений от верхней границы раздела сред // Радиотехника. 2007. № 1.
2. Вязьмитинов И.А., Мирошниченко Е.И., Сытник О.В. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами // Радиофизика и электроника. 2007. Т.12. № 2.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: «Радиотехника», 2005.
4. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7.
5. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // Материалы VII Всероссийской научной конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» (VI Всероссийские Армандовские чтения, «Муром`2016»). – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.
6. Замятин А.В., Марков Н.Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
7. Бабокин М.И. Измерение сдвигов земной поверхности в комплексах дистанционного зондирования Земли // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. №8.
8. Ефимов А.В., Карпов О.А., Криштопов А.В., Толстов Е.Ф. Синтезирование апертуры антенны при переходе к сверхширокополосным зондирующим сигналам // Радиотехника. 2012. № 10.
9. F. Lombardini «Differential Tomography: A New Framework for SAR Interferometry» // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol.43, No.1, January 2005.

10. Francesco Holecz: «Differential SAR Interferometry», 6th ESA Training Course on Radar Remote Sensing, Maribor, September 2015.
11. Jolanda Patruno, Magdalena Fitzryk, Jose Manuel Delgado Blasco: «Monitoring and Detecting Archaeological Features with Multi-Frequency Polarimetric Analysis» // Remote Sensing, December 2019.
12. Deodato Tapete, Francesca Cigna: «COSMO-SkyMed SAR for Detecting and Monitoring of Archaeological and Cultural Heritage Sites» // Remote Sensing, June 2019.