

DOI 10.24412/2221-2574-2024-4-8-16

УДК 621.396

Е.Ф. ТОЛСТОВ И ЦИФРОВАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ ЗЕМЛЕОБЗОРА

Титов Михаил Петрович

кандидат технических наук, заместитель начальника отдела АО «АЭРОКОН».

E-mail: TitovMP@mail.ru

Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д. 1.

Аннотация: Приводятся краткие биографические сведения о д.т.н. профессоре Е.Ф. Толстове. Показывается развитие идей и методов цифровой обработки сигналов в применении к радиолокаторам с синтезированием апертуры антенны (РСА). Отмечается, что в сфере научных интересов Е.Ф. Толстова находится широкий круг вопросов, связанных с синтезом высокоинформативных радиолокационных изображений (РЛИ). Приводятся примеры полученных изображений с борта космического аппарата «Кондор-Э» и авиационных носителей РСА. Отмечаются пионерские работы Е.Ф. Толстова по внедрению бортовой цифровой обработки радиолограмм, по фазовому портретированию движущихся объектов (эффект Толстова), по бистатическому многоярусному землеобзору.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), цифровая сигнальная обработка (ЦСО), обработка на борту, фазовый портрет, интерферометрия, бистатическая радиолокация.

Per aspera ad astra (лат.)

Через тернии к звёздам

Евгений Фёдорович Толстов родился 7 января 1940 г. в деревне Иванищи Гусь-Хрустального района Владимирской области.

Евгений Фёдорович пришел в авиацию, начав учебу во Владимирском авиамеханическом техникуме. Далее учился в Тамбовском радиотехническом училище, которое закончил в 1962 г. с отличием. После окончания училища он служил в военно-транспортной авиации г. Тарту до 1967 года. Далее он поступил в Военно-воздушную инженерную академию им. проф. Н.Е. Жуковского, которую и закончил с золотой медалью в 1972 г., после чего ему предложили остаться на кафедре 42 адъюнктом¹. После защиты кандидатской диссертации он был оставлен на кафедре 42 (это была кафедра воздушной разведки).

Когда в 1979 г. автор данной статьи был зачислен в адъюнктуру кафедры 42, Евгений Фёдорович был уже старшим научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории (НИЛ-21) при кафедре 42. На фото Евгений Фёдорович предстаёт во время подго-

¹Адъюнктура — форма подготовки научно-педагогических кадров для ВС РФ. Является военным аналогом аспирантуры.



Е.Ф. Толстов (1988 г.)

товки докторской диссертации, которую он защитил в 1988 г.

На кафедре, кроме обучения слушателей академии, профессорско-преподавательский состав занимался научными исследованиями в области получения детальных изображений разведываемой местности. Заметную роль в решении этой задачи играют радиолокацион-



Сотрудники научно-исследовательской лаборатории кафедры № 42 (середина 80-х): слева направо Толстов Е.Ф., Мансуров В.В., Хромогина Л.Г., Титов М.П., Шрамко В.Н.

ные системы и станции (РЛС). В этих изысканиях принимали активное участие такие преподаватели как Иццоки Я.С., Поздняков В.Г., Школьный Л.А., Фирсов Л.П. и другие. Особую роль играл Евгений Фёдорович Толстов, который разрабатывал теорию цифровых систем обработки (ЦСО) в РЛС с синтезированием апертуры антенны (РСА).

В то время к этой идее никто серьёзно не относился, так как цифровые вычислительные машины (ЦВМ) тогда были очень большими и занимали несколько комнат, а то и зданий. Такие ЦВМ было немыслимо разместить на борту самолёта. Поэтому в шутку ЦСО для РСА тогда называли «сноповязалкой». Это вызвано тем, что в первых отчётах по НИР для понимания «генералами» сути и физики процессов предварительная фильтрация была описана как вязание снопов. Для доказательства правильности предлагаемых подходов была рассчитана и изготовлена специальная ванна, модели-

рующая обработку сигналов РСА на воде. Кроме того, были изготовлены макеты ЦСО на транзисторах. Первый реальный полет с РСА и макетом бортовой цифровой системы обработки был выполнен в 1978 году на ИЛ-18 (на летающей лаборатории НПО «Ленинец»).

РСА в то время уже широко использовались на самолётах-разведчиках, но все они были рассчитаны на оптическую обработку (т.е. сигнал фиксировался на фотоплёнку, а для получения изображения требовалась её проявка). В этом варианте применение РСА с таким видом обработки на ударных самолётах конечно не представляется возможным. Возможность получения изображений на борту самолёта появилась лишь с внедрением цифровой обработки сигналов. В 1988 году была издана монография по теории ЦСО в РСА [1], ключевую роль в написании которой сыграл Евгений Фёдорович. Эта монография описывает разработанные им основные способы и алгоритмы



Группа исследователей радиолокационного землеобзора (ГИРЗО)

цифровой обработки сигналов РСА, базовые элементы которых используются во всех современных системах обработки. Хочется отметить, что в этих алгоритмах не использовались какие-либо западные наработки. Эту книгу можно назвать учебником по ЦСО в РСА. Бурное развитие элементной базы в радиоэлек-

тронике, переход от дискретных компонентов к интегральным микросхемам дали возможность построения специальных бортовых программируемых процессоров сигналов (ППС). Первым в СССР таким ППС был Ц-200 (главный конструктор — Михайлуца), непосредственное участие в разработке которого при-

нимал Евгений Фёдорович. Применение Ц-200 и последующих за ним ППС серии «Багет» обеспечило работу РСА в реальном (квазиреальном) времени, что обеспечило возможность использования цифровых РСА (ЦРСА) в ударных самолётах.

В то время в академии выполнялись лишь исследовательские работы (НИР). Но возможность установки на ударные самолёты РЛС с высоким линейным разрешением привела к заданию впервые в академии, к тому же непрофильной кафедре, опытно-конструкторских работ (ОКР) на разработку программного обеспечения для СУ-27 (главный конструктор Т.О. Бекирбаев) и МиГ-29 (главный конструктор Ю.Н. Гуськов).

Хочу отметить роль Евгения Фёдоровича в работе в Договоре по Открытому Небу. По просьбе руководства он принимал активное участие в подготовке этого договора в качестве технического консультанта. Он снискал большое уважение своих коллег, в том числе и иностранных. Они его именовали не иначе как «господин профессор».

В начале 80-х годов Евгений Фёдорович работал над докторской диссертацией. На заседании академического Совета, организованного заместителем начальника академии по науке Белоцерковским С.М., произошёл интересный случай. Евгений Фёдорович докладывал результаты своей работы (в несколько упрощённом виде, так как присутствовали на Совете и не специалисты по радиолокации). Начальник кафедры 36 Кочетков Ю.А. уловил упрощения и спросил, есть ли на кафедре 42 специалиста по ЦРСА. Евгений Фёдорович ответил что есть. На вопрос: «Кто?» был ответ: «Я». В зале повисла тишина. После этого Евгений Фёдорович и Кочетков были в хороших, приятельских отношениях. Вообще у Евгения Фёдоровича есть принцип «общаться с людьми так, чтобы при необходимости к ним в дальнейшем можно было вернуться». Это ещё раз характеризует его как человека с большой буквы. Этим принципам следуют и все, кто работает с ним.

После ухода из армии (и из академии) в 1996 г. Евгений Фёдорович продолжил работу в области дальнейшего исследования ЦРСА. Он собрал вокруг себя группу специалистов по ЦРСА (все имели учёные степени не ниже к.т.н. в этой области). Эта группа получила название «Группа исследователей радиолокационного землеобзора» (ГИРЗО) или неофициально — «группа Толстова». Под его руководством разработаны алгоритмы ППС и произведены лётные испытания ЦРСА для СУ-30мки, МиГ-29, СУ-34р, вертолёта КА-27, различных БПЛА и т.д. Некоторые итоги научных исследований по цифровой обработке траекторного сигнала этого периода подведены в сборнике [2], а затем и в учебном пособии [3].

Дальнейшим шагом в его деятельности была работа с ЦРСА, предназначенными для установки на космические аппараты (КА). Эта работа выродилась сначала в разработку РЛС «Спинар» (ЦРСА КА «Аркон» НПО им. Лавочкина), РЛС «Элсар» (ЦРСА КА «Метеор-3М» ВНИИ ЭМ). На тот момент Евгений Фёдорович, уже уволившийся из армии, работал в НППЦ «Элсов», а затем в НППЦ «Спурт». И хотя эти разработки и не привели к практической реализации в «железе», они послужили хорошим подспорьем и опытом в последующих работах на космос. Ряд материалов был представлен авторам фундаментальной монографии [4], которая до сих пор является настольной книгой специалистов по РСА. Практическим приложением предшествующих НИР явилась разработка программного обеспечения (ПО) для наземной обработки радиоголограмм РСА КА «Кондор-Э», которое дорабатывалось в процессе лётных испытаний [5–7]. Ниже (рис. 1) приведено радиолокационное изображение (РЛИ) бухты Перл-Харбор, полученное под руководством Е.Ф. Толстова на основе радиоголограммы от цифрового РСА КА «Кондор-Э».

Таким образом, Евгений Фёдорович является законодателем в области обработки радиолокационных сигналов ЦРСА обзора земной поверхности и продолжает научную работу в

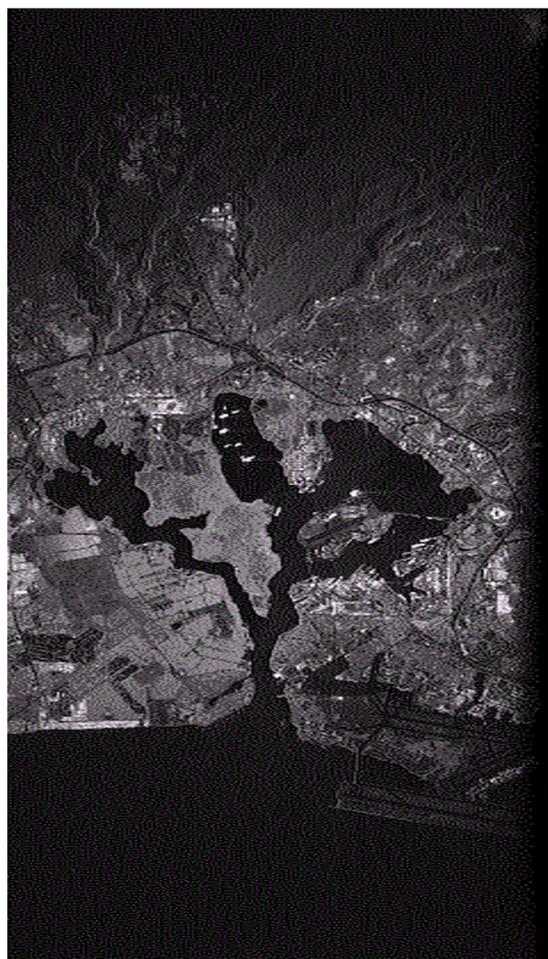


Рис. 1. РЛИ бухты Перл-Харбор

этой области. Так под его руководством д.т.н. Бабокин М.И. выполняет работы по анализу и использованию фазы принимаемых ЦРСА сигналов. Это даёт возможность получить алгоритмы следующих режимов:

- измерения относительных высот поверхности,
- селекции движущихся объектов,
- определения сдвигов элементов поверхности,
- определение высоты волн и т.д.

Значительные результаты получены в направлении фазового портретирования наблюдаемых сцен [8]. В частности было показано, что на динамическом фазоразностном портрете объекты, отличающиеся по высоте, выглядят более объёмно и детально, а помехи неоднозначности по азимутальной координате существенно ослабляются. Именно использование фазового портретирования позволило выявить дополнительные признаки и эффективно обнаруживать на объектах вращающиеся детали (например, антенн РЛС с механическим вращением) или периодические колебания самих объектов (например, качка на волнах) (эффект Толстова).

На рис. 2 приведено РЛИ китайского космодрома, причём слева представлено собственно РЛИ, а справа — его динамический фазоразностный портрет. На нем хорошо видна так называемая «гирлянда» сигналов, которая представляет собой фазовый портрет вращающихся предметов (скорее всего антенны РЛС). Особенно показателен фазовый портрет контейнеровоза (рис. 3). Здесь удалось подобрать параметры фазового портретирования такими, что практически не видно изображе-

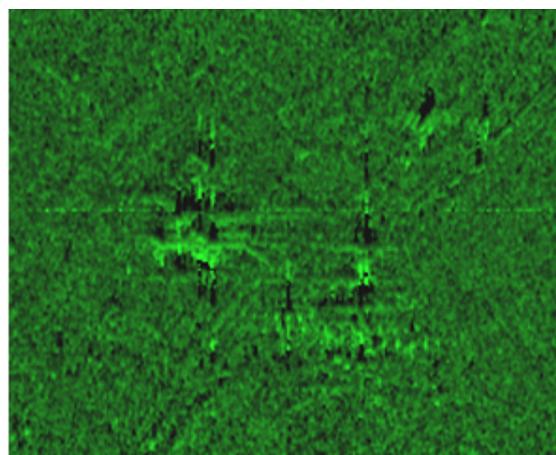
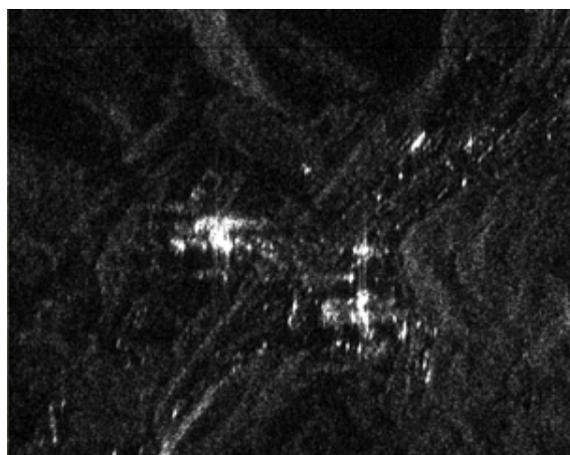


Рис. 2. РЛИ китайского космодрома и его фазовый портрет

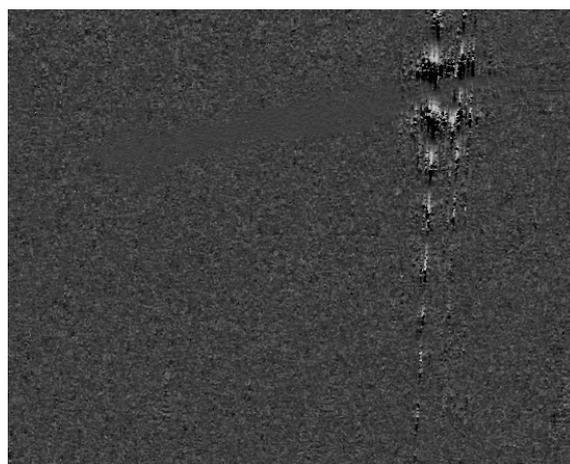
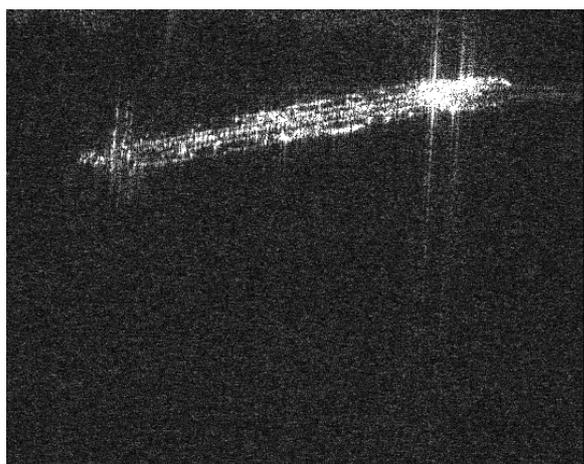


Рис. 3. РЛД контейнеровоза с вращающимися антеннами РЛС

ний корпуса контейнеровоза, мощных отражателей на баке и их боковые лепестки. Вместе с тем, хорошо выделяются изображения вращающихся антенн в кормовой части судна (предположительно работают две навигационные РЛС).

В результате проведенных исследований показано, что фазовое портретирование позволяет расширить возможности РСА радиовидения по всем направлениям функционирования и режимам съёмки, служит дополнительным источником информации для дешифрирования радиолокационных изображений.

Другим направлением исследований Евгения Фёдоровича является разработка требований к измерениям траекторных нестабильностей [9]. Дело в том, что не устраненные отклонения траектории перемещения центра фаз антенны вызывают искажения фазы принимаемого сигнала, а это в свою очередь вызывает искажения получаемого РЛД. Измерениями их и последующим учётом занимается так называемая система «микронавигации». Это особенно важно для авиации, так как имеющиеся штатные навигационные системы не обеспечивают нужных характеристик. К сожалению, далеко не все специалисты по системам навигации понимают эти проблемы. Как альтернатива Евгением Фёдоровичем был предложен и разработан адаптивный подход к решению проблемы, т.е. уточнение траектории по при-

нимаемому сигналу. Этот метод прошёл все три известные стадии новых разработок («какая чушь», «в этом что-то есть», «кто же этого не знает»). Сейчас такие алгоритмы используются повсеместно.

Можно сказать, что повышение качества РЛД является стратегическим направлением научных исследований Е.Ф. Толстова. От его внимания не ускользают такие вопросы, как оценка показателей качества изображений, в первую очередь — разрешающей способности объектов на РЛД [10], организация автофокусировки и коррекции искажений сигналов [5], снижение уровня неоднозначности по дальности и по азимутальной координате [11].

Ещё одним направлением деятельности Евгения Фёдоровича является получение РЛД в многопозиционном (в частном случае — бистатическом) режиме, т.е. когда одни РЛС (активные) излучают, а принимают другие (пассивные) РЛС. В 2005 году был проведён лётный эксперимент по такой работе. В эксперименте принимали участие штатные РЛС самолётов МиГ-29 (небольшой доработке при этом подверглось лишь ПО). Ниже приведён пример полученного в ходе этого эксперимента РЛД (рис. 4). Можно с уверенностью сказать, что это был первый в России эксперимент, а на боевых самолётах со штатными РЛС это сделано впервые в мире (по крайней мере, автору

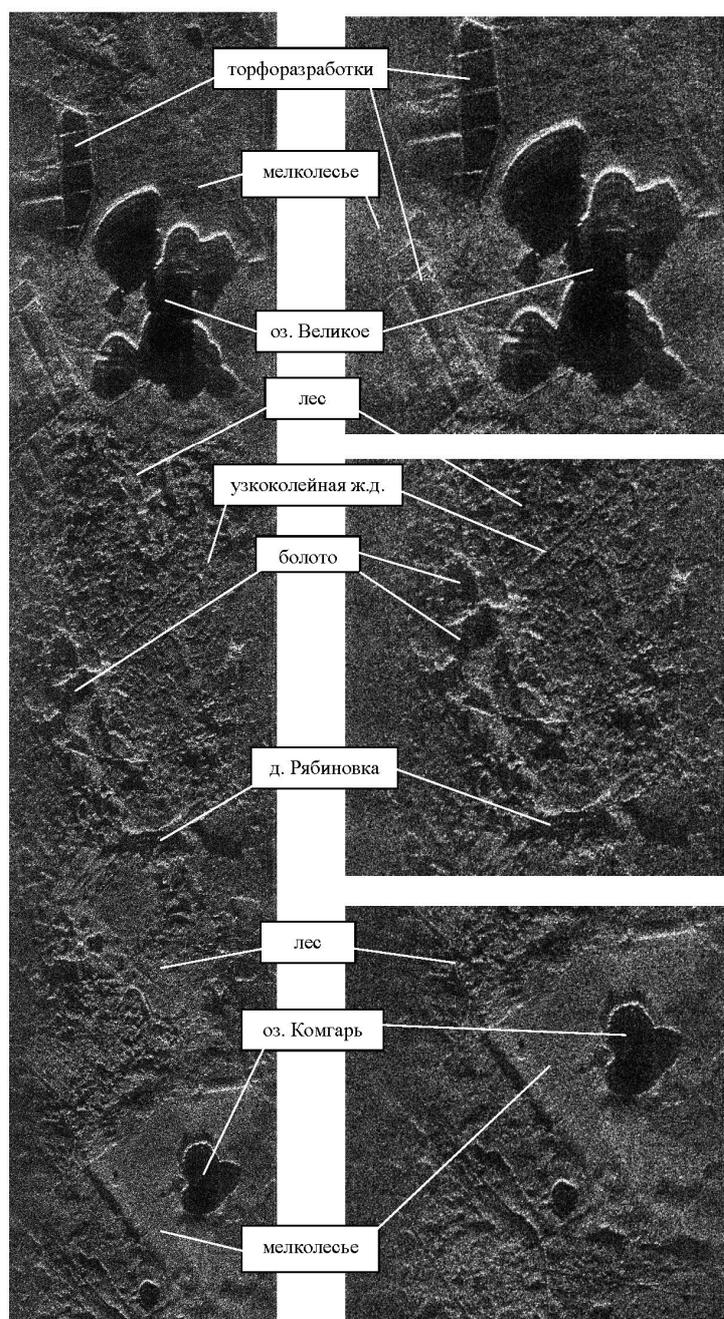


Рис. 4. Сравнение РЛИ, полученных активным РСА (слева) и бистатическими РСА (справа)

о постановке такого эксперимента за рубежом ничего неизвестно).

Дальнейшим развитием многопозиционных систем РСА являются результаты исследования размещения активной позиции на геостационарной (геосинхронной) орбите [12], а пассивной части — либо на авиационных носите-

лях, либо на низкоорбитальных КА. Концепция многоярусного построения систем землеобзора продолжает формироваться и развиваться в научно-исследовательских работах по созданию комплексов Геосар в составе геосинхронной системы всепогодного радиолокационного наблюдения Земли.

В заключение можно сказать, что Евгений Фёдорович является родоначальником и наиболее грамотным специалистом в области цифровой обработки сигналов бортовых ЦРСА землеобзора. Он признанный специалист не только в теории вопроса, но и в практике применения таких РЛС ввиду тесных связей с фирмами-разработчиками РСА. Кроме чисто профессиональных качеств хочется отметить его такие замечательные человеческие качества как доброта, порядочность и уважение к людям, в том числе к подчинённым.

Литература

1. Антипов В.И., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., Титов М.П., Толстов Е.Ф. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
2. Цифровая обработка сигналов в РСА. Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2005. 232 с.
3. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., М.П. Титов и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского. Под ред. Л.А. Школьного. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турок В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Под ред. В.С. Вербы.

М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

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» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06.2016 г., Муром). Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2016. С. 16–36.

6. *Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е.* Космический аппарат «Кондор-Э» и его возможности // Исследование Земли из космоса. 2017. №3. С. 85–95. DOI: 10.7868/S0205961417030010.

7. *Турук В.Э., Верба В.С., Толстов Е.Ф. и др.* РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 69–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.

8. *Бабокин М.И., Костров В.В., Толстов Е.Ф.* Фазовый портрет в космических РСА радиовидения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №4. С. 4–14.

9. *Бабокин М.И., Карпов О.А., Толстов Е.Ф.,*

Бабиченко А.В., Краснов В.В., Некрасов А.В. Требования к современным системам микронавигационного обеспечения РСА // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2019. С. 410–427.

10. *Карпов О.А., Костров В.В., Толстов Е.Ф.* Сравнительный анализ двух критериев и методов измерения пространственного разрешения РЛС при радиолокации и радиовидении // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №3. С. 30–42.

11. *Толстов Е.Ф., Федоров В.С.* Свойства кодов Голда и неоднозначность в РСА // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. №4. С. 41–50. DOI: 10.24412/2221-2574-2023-4-41-50

12. *Зайцев С.Э., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Цветков О.Е.* Предложения по бистатическому радиолокационному обзору земной поверхности при размещении активной позиции на геостационарной орбите // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2019. С. 395–402.

Поступила 9 октября 2024 г.

English

E.F. TOLSTOV AND DIGITAL RADAR SURVEY

Mikhail Petrovich Titov — PhD in Engineering, Deputy Head of the Department, JSC AEROCON.
E-mail: TitovMP@mail.ru

Address: 140180, Russian Federation, Moscow region, Zhukovsky, Gagarin str., 1.

Abstract: Brief biographical information about the Doctor of Technical Sciences, Professor E.F. Tolstov is provided. The development of ideas and methods of digital signal processing in application to synthetic aperture radar (SAR) for remote sensing of the Earth is shown. It is noted that in the sphere of scientific interests of E.F. Tolstov there is a wide range of issues related to the synthesis of highly informative radar images. Examples of the images obtained from the board of the spacecraft "Condor-E" and the aircraft carriers of the SAR are given. The pioneering works of E.F. Tolstov are noted on the introduction of on-board digital processing of radio holograms based on the first programmable signal processors C-200, and then computing modules "Baguette". This ensured the synthesis of radar images in real (quasi-real) time. Developed by E.F. Tolstov's methods of phase portraiture made it possible, when solving problems of observing moving objects, to identify additional informative signs and effectively detect rotating parts on objects (for example, radar antennas with mechanical rotation) or periodic fluctuations of the objects themselves (for example, rolling on waves) (the Tolstov effect). Work on the research and implementation of the bistatic shooting mode led to the formulation of a unique experiment in the operation of regular radar MiG-29 aircraft. It is shown that the quality of the radar images obtained differs slightly from the quality of the images synthesized in the active mode. At the same time, the bistatic mode of operation ensures secrecy of operation, lower energy costs. The development of a space version of the multi-position RSA complex led to the study of the multi-tiered principle of building an earth observation system, when active positions are located in a geostationary (geosynchronous) orbit, and the passive part of the RSA is placed on aircraft carriers or on low-orbit spacecraft.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), digital signal processing (DSP), on-board processing, phase portrait, interferometry, bistatic radar.

References

1. *Antipov V.I., Goryainov V.T., Kulin A.N., Titov M.P., Tolstov E.F.* et al. Digital synthetic aperture radars. Ed. by *V.T. Goryainov*. Moscow: Radio i svyaz, 1988. 304 p.
2. SAR digital signal processing. Ed. by *E.F. Tolstov*. Smolensk, VPVO WA Publishing house of Russian Armed Forces, 2005. 232 p.
3. *Shkolny L.A., Tolstov E.F., Titov M.P.* et al. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images. Moscow: Publishing House of the VVIA named after Prof. N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
4. *Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.* Space-borne Earth Surveillance Radar Systems. Ed. by *V.S. Verba*. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
5. *Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Tolstov E.F., Titov M.P.* et al. Results and lessons of flight tests of the SAR of the small spacecraft "Condor-E". VI All-Russian Armand readings: Radiophysical methods in remote sensing of environment: VII All-Russian Scientific Conference (31.05–2.06.2016, Murom). Murom, MI VISU, 2016. Pp. 16–36.
6. *Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Karpov O.A., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E.* The Condor-E spacecraft and its capabilities. Exploration of the Earth from space. 2017. No. 3. Pp. 85–95. DOI: 10.7868/S0205961417030010.
7. *Turuk V.E., Verba V.S., Tolstov E.F.* et al. Strizh SAR for small Condor-E satellites. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2017. Vol. 14. No. 5. Pp. 69–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.
8. *Babokin M.I., Kostrov V.V., Tolstov E.F.* Phase portrait in space SAR radio vision. Radio Engineering and Telecommunications Systems. 2017. No. 4. Pp. 4–14.
9. *Babokin M.I., Karpov O.A., Tolstov E.F., Babichenko A.V., Krasnov V.V., Nekrasov A.V.* Requirements for modern systems of SAR micro-navigation support. All-Russian Open Armand readings: Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction. Proceedings of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2019. Pp. 410–427.
10. *Karpov O.A., Kostrov V.V., Tolstov E.F.* Comparative analysis of two criteria and methods for measuring the spatial radar resolution in radar and radio vision. Radio Engineering and Telecommunications Systems. 2017. No. 3. Pp. 30–42.
11. *Tolstov E.F., Fedorov V.S.* Properties of Gold codes and ambiguity in SAR. Radio Engineering and Telecommunications Systems. 2023. No. 4. Pp. 41–50. DOI: 10.24412/2221-2574-2023-4-41-50.
12. *Zaitsev S.E., Titov M.P., Tolstov E.F., Tsvetkov O.E.* Proposals for a bistatic radar survey of the Earth's surface when placing an active position in geostationary orbit. All-Russian Open Armand readings: Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction. Proceedings of the All-Russian Open Scientific Conference. Murom: MI VISU, 2019. Pp. 395–402.