

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 2

**Тула
Издательство ТулГУ
2024**

4. Пафилов Е.А., Мамон Ю.И., Смыляев Д.В. Влияние блестящих точек на положение фазового центра протяжённого радиолокационного объекта // Труды российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, серия: научные сессии Тульской областной организации выпуск XXXVII. –Тула: ТуЛГУ – 2019 – С.57-64

Пафилов Евгений Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, evgeniy_pafikov@mail.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения,

Минаков Евгений Иванович. д-р техн. наук, профессор, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Желонкин Дмитрий Васильевич, адъюнкт, dizhelonkin58l@yandex.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения,

Ишков Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, asihkov@mail.ru Россия, Пенза, Пензенский государственный университет.

Бочкарев Сергей Викторович, канд. техн. наук, преподаватель, bochkarevsergejj@rambler.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения

THE METHODOLOGY FOR CALCULATING THE COMBAT EFFECTIVENESS OF THE GOS

E.A. Pafikov, E.I. Minakov, D.V. Zhelonkin, A.S. Ishkov, S.V. Bochkarev

A general systematic approach is considered by evaluating the effectiveness homing head for shells of an artillery system designed to solve tasks in the interests of regimental artillery (PA) by conducting a morphological analysis. Obviously, the next step should be to consider the issue of specifying the performance indicators of the homing head.

Key words: homing head, systematic approach, efficiency, calculation, ammunition, analysis.

Pafikov Evgeny Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, evgeniy_pafikov@mail.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Minakov Evgeny Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Tula, Tula State University,

Zhelonkin Dmitry Vasilyevich, adjunct, Dizhelonkin58l@yandex.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Ishkov Anton Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, asihkov@mail.ru, Russia, Penza, Penza-state-university,

Bochkarev Sergey Viktorovich, candidate of technical sciences, lecturer, bochkarevsergejj@rambler.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics

УДК 623.4.01

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-75-76

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

А.В. Пыхтункин, Е.И. Минаков, А.С. Ишков, Е.Б. Середа

Проведен анализ существующих методов построения радиолокационного изображения.

Ключевые слова: синтезированная апертура, доплеровская частота, круговой апертурный синтез, метод синтеза апертуры вращающихся объектов.

При испытательных стрельбах ракеты с борта на землю по телеметрическому каналу, наряду с другой информацией, передаются отсчеты траекторного доплеровского сигнала. Используя приёмы синтеза апертуры антенны, есть возможность восстановить пролётную ситуацию по траекторному доплеровскому сигналу, не прибегая к дорогостоящим дополнительным системам траекторного контроля, для которых потребуется место на борту ракеты и дополнительный объём телеметрического канала.

Синтезированная апертура антенны - это воображаемая апертура антенной решётки, которая синтезируется в результате движения по траектории летательного аппарата одним единственным антенным элементом с изотропной диаграммой направленности. Единственный движущийся элемент, занимая ряд последовательных положений на траектории, ведёт себя как полноценная антенная решётка с множеством изотропных элементов, расположенных вдоль апертуры (траектории) с некоторым шагом. Как реальная, так и синтезированная антенная решётка имеет узкую диаграмму направленности. Угловая ширина диаграммы антенной решётки определяется длиной её апертуры. Они связаны обратно пропорциональной зависимостью:

$$\Delta\theta = \lambda / d,$$

где $\Delta\theta$ – угловая ширина диаграммы направленности в радианах; λ – длина волны; d – длина апертуры.

Синтезированная апертура совпадает с траекторией движения летательного аппарата и значительно превышает его размеры. Реальную антенную решётку с такой же длиной как синтезированная апертура на летательном аппарате разместить невозможно. Из [1-4] известно, что мы можем рассчитывать при этом на разрешение $\lambda/5$. Такое высокое разрешение синтезированной апертуры подталкивает к применению её для распознавания образов объектов, а также в радиолокации, томографии и интроскопии.

Синтез апертуры на близком расстоянии имеет много особенностей по сравнению с синтезом апертуры антенны в дальней зоне. Эти особенности не позволяют просто перенести приёмы синтеза апертуры антенны, которые используются на большом расстоянии, на близкое расстояние. Первое препятствие, мешающее такому переносу, это проблема радиального разрешения.

Для повышения разрешения уменьшают длительность зондирующего импульса. В итоге пространственная протяжённость зондирующих импульсов сравнивается с длиной волны. При таком соотношении пространственной протяжённости импульса и длины волны синтез апертуры становится невозможным, так как он основан на обработке фазы когерентного высокочастотного колебания, заполняющего радиопульс, а она разрушена импульсной модуляцией. В связи с этим привлекательным становится синтез апертуры на близком расстоянии при монохроматическом зондирующем сигнале.

Однако в настоящий момент не разработаны теоретические основы синтеза апертуры антенны на близком от объекта расстоянии, пригодные для контроля реализовавшихся параметров движения объектов. Известный круговой синтез апертуры антенны [5-11] характерен тем, что он осуществляется в спектральной области проекционными методами и не пригоден для траекторного контроля движущихся объектов по прямолинейной траектории. Поэтому разработка теоретических основ синтеза апертуры на близком расстоянии от объекта для осуществления траекторного контроля является актуальной задачей.

Принцип согласования области срабатывания с областью поражения в доплеровских системах ближней локализации основан на фиксации углового положения цели по доплеровской частоте в соответствии с формулой,

$$f_d(t) = (2V_{OT} / \lambda) \cos\varphi(t),$$

где f_d – доплеровская частота; V_{OT} – скорость лоатора относительно цели; $\varphi(t)$ – угол между траекторией и линией визирования на цель; λ – длина волны.

Как правило, доплеровская частота f_d фиксируется отстроенным узкополосным доплеровским фильтром.

Такое согласование по существу является примитивным синтезом апертуры антенны на близком расстоянии. Чтобы сделать последний шаг к полноценному синтезу апертуры антенны, нужно перейти к корреляционной обработке траекторного доплеровского сигнала.

Применение апертурного синтеза на близком расстоянии связано с развитием томографии. Идея о том, что непрерывные монохроматические сигналы обладают пространственным разрешением и позволяют воссоздать изображение объекта, была уже известна многим специалистам в 60-х годах.

В то время широкое распространение получил метод реконструкции изображения вращающихся объектов. Однако, обобщающие работы по такой реконструкции с хорошим теоретическим обоснованием, показывающие как можно реконструировать изображение вращающегося объекта по рассеянному им полю, появились в начале восьмидесятых годов [12-15]. Несколько раньше вышли работы, которые дали математический и теоретический фундамент для этого метода. К ним относятся работы о преобразовании Фурье в полярных координатах, а также работы, посвященные проекционным методам томографии [5-11].

Следует отметить, что Д. Менса, Ш. Халеви и Г. Уейд распространили на круговой апертурный синтез приёмы метода восстановления изображения по проекциям, заимствованные из рентгеновской томографии. Метод восстановления изображения по проекциям был разработан и технически реализован английскими учёными Хаунсфилдом (G.N.Hounsfield) и Мак-Кормаком (A.McCormack). Как выяснилось впоследствии, впервые такая задача была решена Раденом в 1917 году. Хаунсфилд и Мак-Кормак и их последователи "переоткрыли" идею Радона, разработав попутно ряд новых алгоритмов, использующих возможности современной вычислительной техники [16-20].

В настоящее время доплеровские РЛД работают по-прежнему на примитивных принципах синтеза апертуры, не используя многих информационных возможностей, которые может предоставить полноценный синтез апертуры антенны. Этому есть некоторые оправдания, например, нужно ли расширять количество информации о цели, если её всё равно придётся уничтожить. Другое дело - задачи траекторного контроля на этапе испытаний и отработки всей системы и отдельных узлов зенитного комплекса. В этой ситуации информация о промахе и моменте подрыва может оказаться для разработчиков комплекса особенно ценной, позволяющей корректировать параметры зенитного комплекса в правильном направлении.

В настоящее время хорошо известен метод синтеза апертуры вращающихся объектов с регистрацией пространственного спектра по кольцевой линии (метод Д. Менсы). Этот метод опирается на хороший теоретический фундамент, такой как спектральные теоремы о проекциях и центральном срезе и преобразование Фурье в полярных координатах.

Круговой апертурный синтез позволяет получить хорошее пространственное разрешение. Можно установить теоретические границы достижимого разрешения при применении апертурного синтеза. Для этого нужно использовать аналогию синтезированной апертуры и оптической линзы. Такая аналогия использовалась в [94]. В связи с этим можно воспользоваться известной из оптики формулой для определения радиуса центрального пятна дифракционной картины точечного источника [91]:

$$\rho = \frac{1.22\lambda}{2\alpha},$$

где ρ – радиус центрального дифракционного пятна; λ – длина волны; 2α – угловой размер апертуры.

При круговом апертурном синтезе угловой размер апертуры равен 2λ и радиус центрального пятна составит, согласно приведённой выше формуле, $\lambda/5$. В первом приближении радиус центрального дифракционного пятна можно принять в качестве характеристики разрешения линзы или синтезированной апертуры.

Метод Д. Менсы был опробован в диапазоне СВЧ на волне $\lambda=3$ см. Получены функции рассеяния одноточечных объектов, при различных секторах синтезирования апертуры. В [21] вместо принятого термина в оптике «функция рассеяния точки» введён термин «передаточная функция точки». Получены также функции рассеяния для одноточечных объектов при трёхчастотном и пятичастотном зондировании исследуемого объекта.

Как отмечалось выше, синтез апертуры по методу Д. Менсы обладает высоким пространственным разрешением, но всегда на реконструированном изображении присутствуют артефакты в виде концентрических кругов вокруг максимума передаточной функции точки, обусловленные большим уровнем боковых лепестков этой функции. Для избавления от артефактов была предложена двухпозиционная локация или многочастотное зондирование, что эквивалентно расширению спектра зондирующего сигнала и, фактически, некоторому отступлению от применения монохроматического зондирования объектов.

При представлении своего метода, в котором используется вращение объектов авторы работы [22] ограничились демонстрацией результатов реконструкции одноточечных объектов. Однако основные проблемы начинаются при исследовании многоточечных, а точнее протяжённых объектов.

Одной из таких проблем является интерференция. При реконструкции одноточечных объектов она не проявляется на восстановленных изображениях. В работе [21], проблемы интерференции не были выявлены, а, следовательно, не решались.

Известный до настоящего времени синтез апертуры в спектральной области (метод обращения по Фурье), основанный на обратном преобразовании Радона, сопряжён с рядом ограничений, которые неудобны, а иногда не приемлемы для синтеза апертуры на близком расстоянии. Главное ограничение состоит в том, что в каждую точку регистрации проекции должен приходиться только один проекционный луч, рассеянный объектом волны. Именно это ограничение Радона нарушается при синтезе апертуры на близком расстоянии.

Список литературы

1. Математическое и полунатурное моделирование сигнала от сложных радиолокационных объектов применительно к системам ближней радио-локации с импульсной модуляцией / О.Ф. Андрияшин [и др.] // Специальная техника. - 2008. - № 2. - с. 24-35.
2. Менса Д.Л. Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображения на СВЧ / Д.Л. Менса, Ш. Халеви, Г. Уэйд // ТИИЭР. Т. 71, - №2, 1983. - С. 76-84.
3. Менса, Д. Л. Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображения на СВЧ [Текст] / Д. Л. Менса, Ш. Халеви, Г. Уэйд // ТИИЭР. - 1983. - Т. 71, № 2. - С. 76-84.
4. Ющенко, В. П. Сопоставление двух методов когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Радиотехника и электроника. - 2004. - № 2. - С. 196-205.
5. Турчин, В. И. Многокурсовый апертурный синтез для широко-полосных источников [Текст] / В. И. Турчин, И. Ш. Фикс ; РАИ ИПФ. - Н. Новгород, 2001. - 26 с. - (Препринт № 583).
6. Хелгасон, С. Преобразование Радона [Текст] / С. Хелгасон. - М. : Мир, 1983. - 150 с.
7. Хермен, Г. Восстановление изображений по проекциям: основы реконструктивной томографии [Текст] : пер. с англ. / Г. Хермен. - М. : Мир, 1983. - 231 с.
8. Ющенко, В. П. Доплеровское сканирование структуры объекта с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // Приборы и техника эксперимента. - 2001. - № 2. - С. 41-45.
9. Ющенко, В. П. Круговой апертурный синтез для целей томографии / В. П. Ющенко // Автометрия. - 2002. - Т. 38, № 6. - С. 28-33.
10. Ющенко, В. П. Сопоставление двух методов когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Радиотехника и электроника. - 2004. - № 2. - С. 196-205.
11. Ющенко, В. П. Устойчивость к шумам метода томографирования с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. - 2005. - № 3. - С. 3-9.
12. Way, J. and E.A. Smith, 1991. The Evolution of Synthetic Aperture Radar Systems and their Progression to the EOS SAR, IEEE Transactions on Geo-science and Remote Sensing, vol. 29, № 6, P.962-985.
13. Webb Jennifer, L.H. High-resolution planetary imaging via spotlight-mode synthetic aperture [Текст] / L. H. Webb Jennifer, C.(Jr) Munson, J. S. Stacy Nick // Trans. Image Process. - 1998. - Vol. 7, № 11. - P. 1571-1582.
14. Wong, D. Analysis processing of ultra wide-band SAR imagery for buried landmine detection [Текст] / D. Wong, L. Carin // IEEE Trans. Antennas Propag. - 1998. - Vol. 46, № 11. - P. 1747-1748.
15. Yushchenko, V. P. A Circular Aperture synthesis for Tomography [Текст] / V. P. Yushchenko // The 6th Russian-Korean International Symposium On Science and Technology KORUS-2002, June 24-30.02. - Novosibirsk : NSTU, 2002. - Vol. 1.-P. 374-378.
16. Halman, J. I. SAR processing of ground-penetrating radar data for buried UXO detection: Results from a surface-based system [Текст] / J. I. Halman, K.A. Shubert, G. T. Ruck. // Trans. Antennas and Propag. - 1997. - Vol. 46, № 7. - P. 1023-1027.
17. High resolution MW holographic system for NDT of dielectric materials and details / Ivashov S., Zhuravlev A., Chizh M., and Razevig V. // Proceedings of the 16th International Conference of Ground Penetrating Radar. — Hong Kong, China, 2016. — P. 1-4. DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572595.
18. Jordan, R.L., Huneycutt B.L., and M. Werner, 1991. The SIR-C/X-SAR Synthetic Aperture Radar System, Proceedings of the IEEE, vol. 79, № 6, P.827-838.
19. Mensa, D. Aperture synthesis by object rotation in coherent imaging [Текст] / D. Mensa, G. Heidbreder, G. Wade // IEEE Trans. Nuel. Sci. - 1980. - Vol. 27, №2.-P. 989-998.

20. Saillard, L., E. Pottier and W.-M. Boerner, 1992. Proceedings, Radar Polarimetry, JIPR-2, September 8-10, University of Nantes, IRESTE-S2HF, Nantes, France.
21. Way, J. and E.A. Smith, 1991. The Evolution of Synthetic Aperture Radar Systems and their Progression to the EOS SAR, IEEE Transactions on Geo-science and Remote Sensing, vol. 29, № 6, P.962-985.
22. Taylor C.D., Harrison C.W. On the Coupling of Microwave Radiation to Wire Structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1992. Vol. 34, №3. August. P. 183.

Пыхтункин Алексей Викторович, преподаватель, Россия, Пенза, филиал военной академии материально-технического обеспечения,

Минаков Евгений Иванович. д-р техн. наук, профессор, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ишков Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, asihkov@mail.com, Россия, Пенза, Пензенский государственный университет,

Середа Евгений Борисович, канд. техн. наук, начальник кафедры, Россия, Пенза, филиал военной академии материально-технического обеспечения

ANALYSIS OF METHODS FOR CONSTRUCTING A RADAR IMAGE WITH A SYNTHESIZED APERTURE

A.V. Pykhtunkin, E.I. Minakov, A.S. Ishov, E.B. Sereda

The analysis of the existing methods of radar image construction is carried out.

Key words: synthesized aperture, doppler frequency, circular aperture synthesis, a method for synthesizing the aperture of rotating objects.

Pykhtunkin Alexey Viktorovich, lecture, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Minakov Evgeny Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Tula, Tula State University,

Ishkov Anton Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, asihkov@mail.com, Russia, Penza, Penza State University.

Sereda Evgeniy Borisovich, candidate of technical sciences, head of the department, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics

УДК 623.746

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-78-79

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Е. И. Минаков, С.А. Куканов, П.С. Суздальцев, В.М. Чайковский

В данной статье рассматривается моделирование состояния системы беспилотного летательного аппарата-квадрокоптера. Представлена математическая модель, которая описывает движение и поведение квадрокоптера в пространстве, а также задача которой состоит в том, чтобы обеспечивать движение аппарата в воздухе и управлять стабилизацией аппарата при заданных углах положения, путем подачи управляющих сигналов на двигатели.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, система автоматического управления.

Квадрокоптер – это динамичное летающее средство с пониженным приводом и с четырьмя входными усилиями, имеющее шесть степеней свободы. В отличие от обычных вертолетов, которые имеют несущие винты с переменным углом наклона, квадрокоптер имеет четыре несущих винта с фиксированным шагом и фиксированным углом наклона. Движением квадрокоптера в шести степенях свободы (6DOF) управляют, изменяя обороты четырех несущих винтов по отдельности, тем самым изменяя подъемную силу и вращательные усилия. Квадрокоптер наклоняется в направлении медленно вращающегося двигателя, что позволяет ему крениться и наклоняться по наклонной плоскости. Углы крена и тангажа разделяют тягу на два направления, благодаря чему достигается линейное движение. Несущие винты вращаются парами по часовой стрелке и против (рисунок 1), чтобы контролировать рыскание (угол курса), возникающее из-за силы сопротивления гребных винтов. Центр тяжести находится почти в одной плоскости, в которой расположены все двигатели. Кроме того, все четыре двигателя одного класса не отличаются друг от друга по эффективности. Это отличает его от вертолетов, но его становится очень трудно стабилизировать с помощью человеческого управления. Поэтому для сбалансированного полета квадрокоптера необходимо сложное управление.