Способ синтеза элементов трактов преобразования радиолокационных сигналов в системах дистанционного зондирования Земли

В.К. Цветков, К.С. Лялин, А.Ю. Шеремет Национальный исследовательский университет «МИЭТ», tsvetkov_vk@mail.ru, ksl@miee.ru, dj303@mail.ru

Аннотация — В данной статье приведены результаты исследования влияния параметров трактов преобразования радиолокационных сигналов (ТПРС) в системах дистанционного зондирования Земли на характеристики получаемых изображений. Проведено моделирование ТПРС с целью исследования влияния неоптимальной фильтрации на динамический диапазон и разрешение изображений, разработан метод синтеза узлов и элементов тракта, обеспечивающий получение заданного изображений качества. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие результаты моделирования.

Ключевые слова — радиолокация, РСА, аналоговый тракт, СВЧ устройства, ДЗЗ.

I. Введение

Среди методов дистанционного зондирования поверхности особое земной место занимает радиолокационный метод с применением алгоритмов синтеза апертуры. Метод позволяет работать в условиях затрудненной оптической видимости, в суток. Размещение аппаратуры ночное время радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) летательного на борту малого аппарата или беспилотного летательного аппарата (БПЛА) обуславливает высокие требования массок габаритным характеристикам изделия. Из теории радиолокации известно, что для получения высокой разрешающей способности необходимо обеспечение широкополосности сигналов, а также трактов преобразования этих сигналов. Рассмотренные требования, как правило, труднодостижимы и во многом определяют облик устройства.

Одной из наиболее важных частей РСА являются тракты преобразования радиолокационных сигналов (ТПРС). Искажения в ТПРС способны привести к значительному ухудшению итогового изображения. Разработка ТПРС малогабаритных для широкополосных РСА является задачей повышенной трудоемкости. Снижение трудозатрат на этапах проектирования, настройки и диагностики РСА возможно с применением модели ТПРС. Результаты работы моделью позволят получить с аппроксимационные формулы для оценки качества

изображения при заданных характеристиках ТПРС, либо позволят рассчитать характеристики ТПРС для получения изображения заданного качества.

Вопросы построения ТПРС и выбор их параметров широко освещены в современной научно-технической литературе. Так, например, в работе [1] рассмотрены аспекты построения передающего устройства РСА. В работе [2] рассмотрены вопросы построения приемопередающих модулей для PCA диапазона сверхвысоких частот для беспилотных летательных аппаратов. Вариант построения приемного устройства (малошумящего усилителя с балансной схемой подавления шума) рассмотрен в работе [3]. Вопросы разработки усилителя Х-диапазона частот на основе GaN технологии освещены в [4].

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТПРС

На первом этапе исследований разработана модель ТПРС, структурная схема которой представлена на рис. 1. Модель представляет собой последовательность преобразований H_i входного сигнала S_{in} Преобразования могут быть как линейными (имитировать работу устройств частотной селекции, например), так и нелинейными (имитировать работу усилителей, преобразователей частоты, ограничителей и т.д.). f - функция преобразования выходного сигнала в изображение наблюдаемого участка местности или цели. Отличительной особенностью предлагаемой модели является как раз то, что существует возможность наблюдения характеристик получаемого изображения при изменении параметров тракта.



Рис. 1. Структурная схема ТПРС

В ходе исследований установлено, что ключевыми параметрами получаемого изображения являются динамический диапазон и разрешение. Под динамическим диапазоном понимается максимально возможный «размах» эффективного отклика цели (изображения цели или точки цели), при котором возможно его различение на фоне шума и паразитных составляющих сигнала. При этом вводятся два параметра оценки: ΔP - отношение энергии, заключенной в основном отклике цели, к суммарной энергии фона и отклика (для имитированной в модели точечной цели – суммарной энергии изображения); Δ - отношение максимума эффективного отклика цели к наибольшей паразитной составляющей или шумовой составляющей изображения. Под разрешением получаемого изображения понимается минимальное расстояние между наблюдаемыми объектами, при котором они остаются различимыми.

По итогам моделирования получена статистика результатов, анализ которой позволил вывести эмпирическую зависимость ΔP от отношения мощности сигнала к мощности шума на выходе ТПРС. Полученные результаты могут быть аппроксимированы выражением:

$$\Delta P = \Delta P_{\max} - \Delta P_{\max} e^{\left(-\frac{P_c}{P_w}\right)}, \qquad (1)$$

где ΔP_{max} - максимальное теоретически рассчитанное значение ΔP .

График зависимости представлен на рис. 2.



Рис. 2. Зависимость ΔP от P_{\prime}/P_{\prime} .

Из (1) получено выражение для оценки требуемого отношения мощности сигнала к мощности шума на выходе ТПРС при заданных требованиях к характеристикам изображения:

$$\rho_{mp} = -\ln\left(1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}}\right). \tag{2}$$

Из выражений (1) и (2) следует, что минимизация искажений (достижение $\Delta P \approx 0.9 \Delta P_{\text{max}}$) возможно при

$$\frac{P_c}{P_w} = 2.3$$

По итогам моделирования получена статистика результатов, анализ которой позволил вывести эмпирическую зависимость динамического диапазона изображения от относительной ширины полосы пропускания фильтра. Данная зависимость аппроксимируется выражением:

$$\Delta = \left(\Delta_0 \cdot \frac{\Delta f}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{\Delta f}{\sqrt{2}}},\tag{3}$$

где Δ_0 - предельное теоретически рассчитанное отношение максимума отклика цели к побочным составляющим (боковым лепесткам синтезируемого изображения цели) в отсутствии фильтра, Δf - полоса пропускания фильтра, нормированная на эффективную ширину спектра используемого сигнала.

Соотношение (3) справедливо для значений $\Delta f = 0.1...1$. На рис. 3 и 4 в качестве примера результаты приведены моделирования аппроксимации при использовании в качестве зондирующего сигнала фазокодоманипулированной последовательности Лежандра длиной 271 символ и 127 символов, соответственно. Выбранный тип последовательности используется при построении классу относится называемых PCA, к так «минимаксных» последовательностей, обладает уровнем низким боковых лепестков автокорреляционной функции.



Рис. 3. Зависимость динамического диапазона от относительной ширины полосы фильтра (кодовая последовательность длиной 271 символ)



Рис. 4. Зависимость динамического диапазона от относительной ширины полосы фильтра (кодовая последовательность длиной 127 символов)

Получено аппроксимационное выражение для расчета требуемой относительной полосы пропускания тракта в области высоких частот, обеспечивающей заданный динамический диапазон изображений:

$$\Delta f = \log_{\ln(1-\Delta_0)} \Delta \,. \tag{4}$$

Из выражений (3) и (4) следует, что минимизация искажений (достижение $\Delta \approx 0.9 \Delta_0$) возможно при $\Delta f' = 1.1$.

По итогам моделирования получена статистика результатов, анализ которой позволил вывести эмпирическую зависимость разрешения получаемого изображения от относительной ширины полосы пропускания фильтра. Полученная зависимость аппроксимируется выражением (5) и проиллюстрирована на рис. 5.

$$\delta_n = 1 + \frac{e^{-\Delta f}}{\Delta f} \,. \tag{5}$$



Рис. 5. Зависимость ширины основного отклика цели от относительной ширины полосы фильтра

Получено также выражение для расчета требуемой ширины полосы пропускания полосового фильтра для обеспечения заданного разрешения получаемых изображений:

$$\Delta f' = \frac{\ln \delta_n}{1 - \delta} \,. \tag{6}$$

Из выражений (5) и (6) следует, что минимизация искажений (достижение $\delta_n \approx 0.9$) возможна при $\Delta f' = 1.2$.

Проводилось исследование вопроса согласования выходных цепей тракта с устройством обработки. Цепи согласования, как правило, содержат емкостные элементы, выполняющие задачу развязки элементов устройств по постоянному напряжению. С другой стороны рассматриваемые цепи выполняют задачу частотной селекции, подавляющие части спектра сигналов в области нулевой частоты. Данный эффект приводит к значительным ухудшениям качества получаемого изображения: снижение динамического диапазона, возникновение биений сигнала.

По итогам моделирования получена статистика результатов, анализ которой позволил вывести эмпирическую зависимость динамического диапазона от относительной ширины полосы среза выходных цепей тракта. Зависимость аппроксимируется выражением (7), график зависимости представлен на рис. 6.

$$\Delta = 2\Delta_0 \cdot \mathrm{e}^{-\sqrt{3}\Delta f_{\phi_{H_1}} \cdot \Delta_0} \,, \tag{7}$$

где $f_{\phi_{\mu\mu\mu}}^{\cdot}$ - относительная ширина полосы среза выходных цепей тракта.



Рис.6. Результаты экспериментов с моделью выходных цепей приемного устройства

Получено выражение для расчета требуемой относительной ширины полосы среза в области низких частот для обеспечения требуемого динамического диапазона получаемых изображений:

$$\Delta f'_{\phi_{H^{q}}} = \frac{\ln \Delta}{\Delta_0 \cdot (1 - \Delta)} \,. \tag{8}$$

Из выражений (7) и (8) следует, что достижение $\Delta \approx 0.9 \Delta_0$ возможно при $\Delta f_{\phi_{H^{*}}} = 0.001$.

III. Экспериментальная проверка полученных результатов

Полученные результаты моделирования подтверждены результатами лабораторных экспериментов с макетом РСА. На рис. 7 и 8 в качестве примера приведены результаты корреляции различных принятых сигналов и исходной последовательности при фиксированной полосе пропускания шириной 200 МГц. Из результатов видно, что при расширении сигнала снижается качество спектра отклика согласованного фильтра, появляются и растут боковые лепестки.

Предложен метод расчета параметров синтезированной структуры ТПРС, обеспечивающей минимизацию искажений изображений поверхности Земли. Метод подразумевает выполнение следующих действий: составление структурной схемы рассматриваемого ТПРС, расчет параметров элементов ТПРС с помощью выражений (1) – (8), симуляция структуры ТПРС с применением предложенной модели, проверка полученных результатов.



Рис. 7. Результаты лабораторных испытаний макета ТПРС (сигнал с эффективной шириной спектра 200 МГп)



Рис. 8. Результаты лабораторных испытаний макета ТПРС (сигнал с эффективной шириной спектра 600 МГп)

Апробация метода проводилась в рамках НИР. На рис. 9 приведены осциллограммы сигналов на выходе опытного образца ТПРС, результирующее изображение приведено на рис. 10.



Рис. 9. Выходной сигнал опытного образца ТПРС



Рис. 10. Изображение, полученное в ходе испытаний с опытным образцом ТПРС

В результатах работы наблюдаются биения принимаемого сигнала, «рябь» получаемого изображения. Проведено моделирование рассматриваемого ТПРС, получены осциллограммы моделируемых сигналов и изображения имитатора цели с аналогичными искажениями (рис. 11 и 12).



Рис. 11. Осциллограммы сигналов на выходе модели ТПРС



Рис. 12. Изображение имитированной цели в ходе моделирования ТПРС

Моделирование показало, что искажения изображения вызваны невыполнением требования минимизации искажений при согласовании выходных цепей ТПРС с устройствами обработки. После доработки ТПРС проведены повторные испытания, получены изображения без искажений (рис. 13).



Рис. 13. Изображение, полученное в ходе испытаний с опытным образцом ТПРС после доработки

В соответствии с предложенным методом был модернизирован ряд образцов ТПРС, разработанных в рамках научно-исследовательской работы. Проводились испытания, в ходе которых получались изображения одних и тех же участков местности. На рис. 14 и 15 приведены изображения, в которых динамический диапазон составляет менее 40 дБ, разрешение свыше 1 м.



Рис. 14. Изображение, полученное в ходе испытаний с опытным образцом ТПРС до модернизации (динамический диапазон 40 дБ, разрешение: 1 м)



Рис. 15. Изображение, полученное в ходе испытаний с опытным образцом ТПРС до модернизации (динамический диапазон 30 дБ, разрешение: 1.1 м)

В результате модернизации ТПРС (учет требований минимизации искажений получаемых изображений) стало возможным получение изображений с динамическим диапазоном свыше 60 дБ, разрешением 0.7 м. Результаты испытаний (полученные изображения) приведены на рис. 16 и 17.



Рис. 16. Изображение, полученное в ходе испытаний с опытным образцом ТПРС после модернизации (динамический диапазон 65 дБ, разрешение: 0.7 м)



Рис. 17. Изображение, полученное в ходе испытаний с опытным образцом ТПРС после модернизации (динамический диапазон 60 дБ, разрешение: 0.7 м)

По результатам экспериментальных исследований допустимо сделать вывод о том, что предложенный метод синтеза элементов ТПРС пригоден для проектирования ТПРС и позволяет получить изображения с заданными характеристиками.

IV. Заключение

В рамках данного исследования разработана модель тракта преобразования радиолокационных сигналов для системы дистанционного зондирования Земли, работающей по принципу синтеза апертуры. По результатам работы с моделью получен ряд аппроксимационных выражений, позволяющих дать оценку характеристикам получаемого изображения. Выведены выражения, позволяющие рассчитать требуемые значения элементов тракта для получения изображения с заданными характеристиками. исследования, Проведены экспериментальные результаты результаты которых подтверждают моделирования и предложенный метод синтеза элементов ТПРС. Апробация метода проводилась в рамках НИР с опытными образцами ТПРС. По результатам работ получены изображения, в которых достигнута минимизация искажений вызванных неидеальностью ТПРС.

Данная работа проводится при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки

Российской Федерации в рамках Соглашения №14.578.21.0248 о предоставлении субсидии, идентификационный номер соглашения RFMEFI57817X0248

ЛИТЕРАТУРА

- Achmad Munir, Edwar «FMCW-based SAR transmitter for remote sensing application and its characterization», 2015
 9th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA) 25-26 Nov. 2015
- [2] Achmad Munir, Edwar «Development of SAR transmitter for nanosatellite-based remote sensing application» 2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI) 10-11 Aug. 2015
- [3] Abolfazl Zokaei, Amir Amirabadi, Mehdi Ghasemzadeh «Active balun-based wideband differential LNA for noise and distortion cancellation» Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES), 2014 Proceedings of the 21st International Conference, 19-21 June 2014
- [4] Davide Resca, Antonio Raffo, Sergio Di Falco «X-Band GaN Power Amplifier for Future Generation SAR Systems», IEEE Microwave and Wireless Components Letters (Volume: 24, Issue: 4, April 2014)

RF-frontend Parts of Remote Sensing Systems Synthesis Method

V.K. Tsvetkov, K.S. Lyalin, A.Y. Sheremet National Research University of Electronic Technology,

tsvetkov_vk@mail.ru, ksl@miee.ru, dj303@mail.ru

Abstract — In this paper the research of the influence of RFfrontend parts to the SAR-images quality in remote sensing systems presented. RF-frontend parts were simulated to obtain the dynamic range and resolution characteristics. The RF-frontend parts synthesis method is developed to obtain the images of predetermined quality. The experimental researches confirmed the results of a modelling.

Keywords — radiolocation, SAR, RF-front end, UHF devices, Remote sensing.

REFERENCES

 Achmad Munir, Edwar «FMCW-based SAR transmitter for remote sensing application and its characterization», 2015 9th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA) 25-26 Nov. 2015

- [2] Achmad Munir, Edwar «Development of SAR transmitter for nanosatellite-based remote sensing application» 2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI) 10-11 Aug. 2015
- [3] Abolfazl Zokaei, Amir Amirabadi, Mehdi Ghasemzadeh «Active balun-based wideband differential LNA for noise and distortion cancellation» Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES), 2014 Proceedings of the 21st International Conference, 19-21 June 2014
- [4] Davide Resca, Antonio Raffo, Sergio Di Falco «X-Band GaN Power Amplifier for Future Generation SAR Systems», IEEE Microwave and Wireless Components Letters (Volume: 24, Issue: 4, April 2014)