

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.9>

УДК 537.86

## АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

И. В. Скворцов, Р. Р. Латыпов

Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2020 г.

**Аннотация.** Представлен алгоритм восстановления источников излучения от печатной платы в ближней зоне. Модель печатной платы представлена диполями Герца. Основой алгоритма восстановления является регрессия LASSO, позволяющая с более высокой точностью восстановить параметры источников излучения, чем классический и широко используемый в подобных задачах метод регуляризации Тихонова. Для использования алгоритма восстановления необходимо иметь экспериментальные данные об электромагнитном излучении от печатной платы. В данной статье приводятся экспериментальные результаты восстановления источников излучения от печатной платы предложенным алгоритмом.

**Ключевые слова:** регрессия LASSO, восстановленное дипольное распределение, печатная плата.

**Abstract.** This article presents an algorithm for recovering radiation sources from a printed circuit board in the near field. The model of the printed circuit board is represented by the Hertz dipoles, the equations for which are known. The basis of the reconstruction algorithm is LASSO regression, which allows one to recover the parameters of radiation sources with a higher accuracy than the classical Tikhonov regularization method widely used in similar problems. To use the reconstruction algorithm, it is necessary to have experimental data on electromagnetic radiation from the printed circuit board. Such data can be obtained using a planar scan method.

This article presents the experimental results of reconstructing radiation sources from a printed circuit board using the proposed algorithm.

**Key words:** LASSO regression, reconstructed dipole distribution, printed circuit board.

## Введение

В настоящее время объем производства радиоэлектронной аппаратуры возрос, а стремление к автоматизации производства привело к тому, что в современных печатных платах печатные дорожки и радиоэлектронные компоненты зачастую размещены не оптимальным путем. В процессе своего функционирования вокруг элементов и проводников формируется электромагнитное поле. В ближней зоне это приводит к тому, что создаются паразитные связи и наводки между радиоэлектронными компонентами, оказывающие влияние на соседние компоненты печатной платы. Современные системы автоматизированного проектирования частично справляются с проблемой электромагнитной совместимости, но такие системы не решают задачу локализации источников излучения. По этой причине были предприняты успешные попытки решить задачу локализации методом регуляризации Тихонова [1,2]. Однако данный подход имеет существенный недостаток, связанный с тем, что регуляризация Тихонова использует  $l_2$  норму, не позволяющую отбирать коэффициенты регрессии, что неизбежно приводит к большой ошибке восстановления, особенно в условиях шума. По этой причине применение регрессии LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) [3], использующая в своем функционале  $l_1$  норму, позволяющая отбирать коэффициенты регрессии, является наиболее предпочтительным. В работах [4,5] были приведены результаты сравнения работы двух алгоритмов регуляризации на модельных данных. Регрессия LASSO показала более точные результаты восстановления и большую устойчивость к шуму, чем регуляризация Тихонова. В данной статье приведен алгоритм восстановления и

результаты использования алгоритма восстановления на примере реальной печатной платы.

### Блок-схема алгоритма восстановления источников излучения от печатной платы

Для восстановления источников излучения можно следовать алгоритму, блок-схема которого показана на рис. 1.

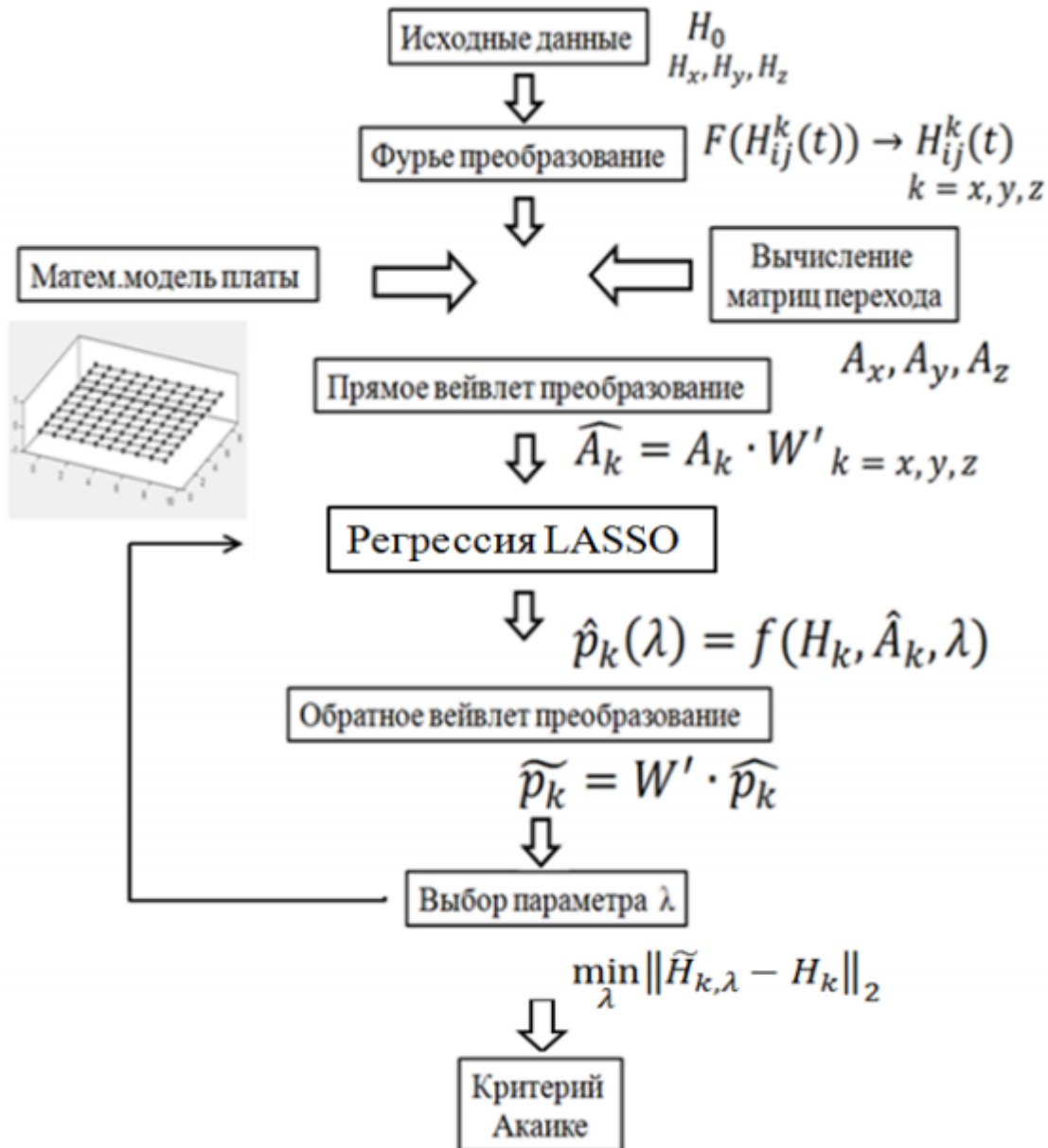


Рис.1. Блок-схема алгоритма восстановления источников излучения от печатной платы.

В качестве исходных данных используются результаты сканирования электромагнитного излучения от печатной платы  $H_x, H_y, H_z$ . Обычно такие измерения проводятся с помощью аппаратно-измерительного комплекса, реализующий планарный способ сканирования [6]. Результатом сканирования является измеренное значение напряженности в каждой точке наблюдения. Далее на основе полученных исходных данных производится преобразование Фурье с целью получить значения сигнала на интересующей частоте. Далее по заданным параметрам ( $h$  – расстояние от объекта до пробника,  $M$  – длина объекта,  $N$  – ширина объекта,  $s$  – шаг сканирования) определяются матрицы перехода  $A_x, A_y, A_z$  и задается математическая модель платы [7], представленная сеткой, в узлах которой расположены эквивалентные излучатели – диполи Герца. Непосредственно сама задача локализации решается методом регрессии LASSO [4] с выбором параметра регуляризации  $\lambda$ . Параметр регуляризации подбирается с учетом минимизации невязки  $\min_{\lambda} \|\tilde{H}_{k,\lambda} - H_k\|_2$ , где  $k$  – компонента излучения,  $H_k$  – исходное значение излучения  $k$ -ой компоненты, полученное при измерениях,  $\tilde{H}_{k,\lambda}$  – излучение  $k$ -ой компоненты при фиксированном параметре  $\lambda$ , формируемое восстановленными при решении задачи локализации источниками излучения. Для сокращения временных и вычислительных затрат на решении задачи локализации источников используется вейвлет преобразование. Основной особенностью использования вейвлетов к задаче локализации является то, что задача локализации решается не для самих источников излучения  $\tilde{p}_k$ , а для их вейвлет образов  $\hat{p}_k(\lambda)$ . А затем, зная матрицу вейвлет преобразования  $W_k'$  можно получить локализацию и самих источников излучения. Более подробно о данной методике написано в статье [5]. Однако метод регрессии LASSO позволяет лишь восстановить координаты источников и мощность их излучения. Для определения количества источников излучения используется критерий Акаике [8].

## Экспериментальные результаты восстановления источников

В качестве излучающей структуры была исследована печатная плата. Параметры сканирования указаны в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры сканирования печатной платы

Высота сканирования, мм	15
Размеры платы, мм	70×50
Число точек измерения	20×15
Шаг измерения, мм	4
Сканирующие компоненты	$H_x, H_y, H_z$

Предварительным этапом является обнаружение существующих гармоник. Спектр излучения от печатной платы показан на рис. 2.

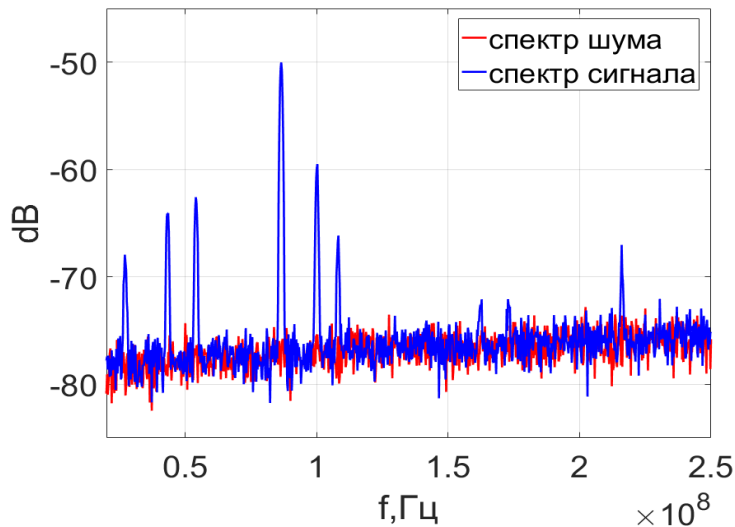


Рис.2. Спектр излучения от печатной платы.

Измерение спектра проводилось на высоте  $h=15$  мм. Система пробников при измерении спектра зафиксирована в центре платы. В качестве примера исследована частота 100 МГц. Полученные результаты измерения представляют собой матрицу, где в каждой ячейки записана временная реализация в точке наблюдения. После чего к каждой временной реализации применялось Фурье-преобразование.

Из рис. 2 видно, что данная гармоника имеет значительный вклад в спектр излучения. Использование Фурье-преобразования к каждой временной реализации позволяет оценить распределение излучения на интересующей частоте. Распределение модуля напряженности магнитного поля на частоте 100 МГц на примере компоненты  $H_x$  приведено на рис. 3.

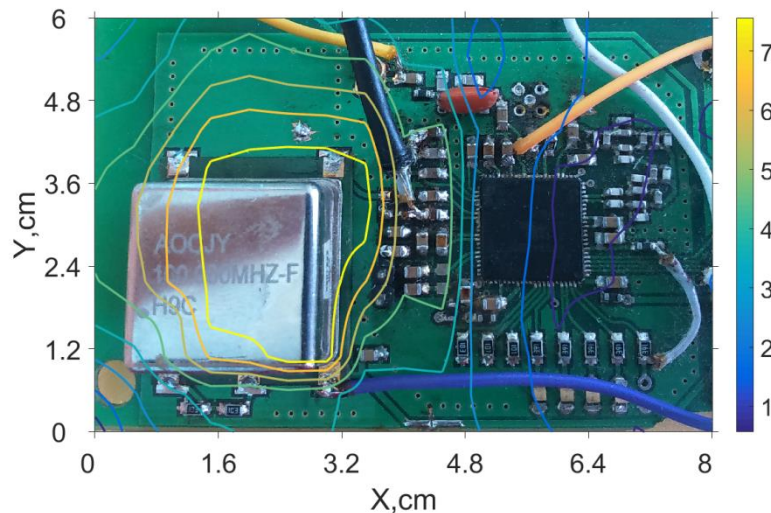


Рис. 3. Распределение  $H_x$  компоненты излучения от печатной платы.

По правую сторону от каждого рисунка отложена шкала, показывающая значения модуля напряженности излучения, имеющая размерность мА/м. Наиболее активные области излучения расположены слева от печатной платы. В левой части печатной платы находится кварцевый генератор на 100 МГц. Он имеет вывод и к нему ведет печатная «дорожка», которая ведет к аналого-цифровому каскаду. Однако получить распределение мощности излучения между кварцевым генератором и печатной «дорожкой» можно только решением обратной задачи.

Для решения обратной задачи использовался алгоритм, описанный ранее. Результатом решения является дипольное распределение. Результаты приведены на рис. 4.



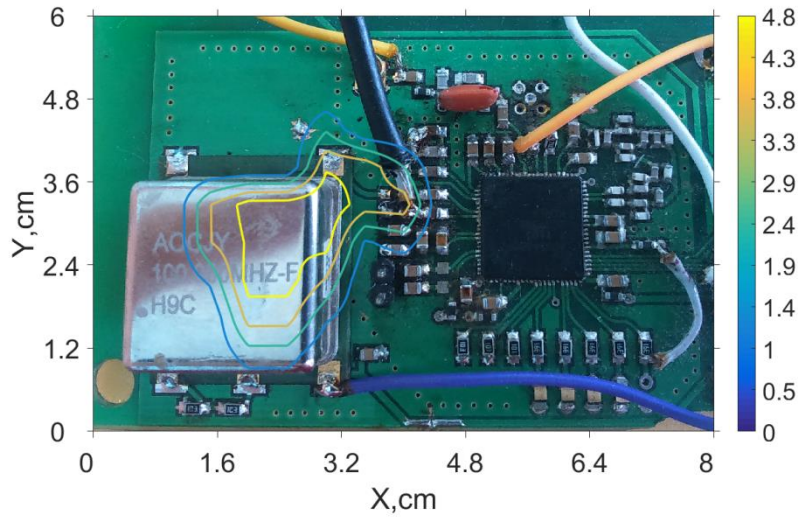


Рис. 4. Дипольное распределение  $p_x$  (регрессия LASSO).

В качестве сравнения также приведены результаты восстановления известным и используемым методом регуляризации Тихонова (рис. 5).

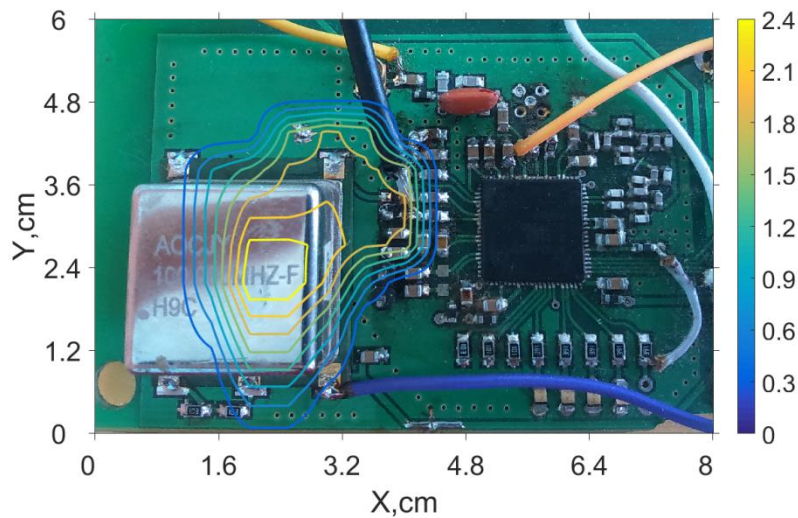


Рис. 5. Дипольное распределение  $p_x$  (регуляризация Тихонова).

Количество восстановленных алгоритмом источников приведено в Таблице 2.

Таблица 2 Количество вейвлет-коэффициентов и число восстановленных источников (регуляризация Тихонова, регрессия LASSO)

	Количество вейвлет-коэффициентов	Количество источников излучения
Регуляризация Тихонова	16	74
Регрессия LASSO	12	69

Из полученных результатов видно, что регрессия LASSO точнее восстанавливает дипольное распределение, чем регуляризация Тихонова. Так, зная, что источником излучения является кварцевый генератор и печатная дорожка, регрессия LASSO восстановила только источники излучения, находящиеся в непосредственной области расположения генератора и печатной дорожки. Регуляризация Тихонова же восстановила дополнительно и источники, находящиеся за пределами расположения генератора и дорожки, что является неправдоподобным по причине того, что соседние области не излучают на частоте 100 МГц из-за особенностей в конструкции данной печатной платы. Полученные результаты находятся в качественном соответствии с выводами статей [4,5].

### **Заключение**

Приведенный алгоритм восстановления источников излучения на примере реальной печатной платы показан качественное соответствие с модельными результатами восстановления. Данный алгоритм, использующий регрессию LASSO, позволяет точнее восстанавливать источники излучения на печатной плате, чем классический подход с регуляризацией Тихонова, который в настоящее время активно используется.

### **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 26.11.2019 г. № 075-11-2019-038 «Разработка многофункционального аппаратно-программного комплекса на основе беспилотных воздушных судов для планирования и сопровождения сейсморазведочных работ»).

### **Литература**

1. Tong X. *Simplified equivalent modelling of electromagnetic emissions from printed circuit boards*. University of Nottingham, PhD thesis. 2010.
2. Горбунова А.А. *Идентификация параметров источников побочных электромагнитных излучений по измерениям в ближней зоне*. МАИ, 2014. 154 с.



3. Tibshirani R. Regression Shrinkage and Selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (methodological)*. 1996. Vol.58. No.1. P.267–288.
4. Skvortsov I.V., Bochkarev V.V., Latypov R.R. Estimation of localization of point sources from printed circuit board in the near field. *Journal of Physics Conference Series*. 2018. Vol.1038. P.1-5.
5. Skvortsov I.V., Bochkarev V.V., Latypov R.R. Localization of distributed radiation sources from from printed circuit board in the near field using wavelet transform. *Journal of Physics. Conference Series*. 2018. Vol.1135. P.1-5.
6. Скворцов И.В., Латыпов Р.Р., Шерстюков О.Н., Бабаев Р.Ф. Экспериментальная установка для измерения электромагнитного излучения от излучающей структуры в ближней зоне. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019. №11.  
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.13>
7. Laurin J.J., Zürcher J.F., Gardiol F.E. Near-field diagnostics of small printed antennas using the equivalent magnetic current approach. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 2001. Vol.49. No.5. P.814-828.
8. Akaike, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974. Vol.19. P. 16-723.

**Для цитирования:**

Скворцов И.В., Латыпов Р.Р. Алгоритм восстановления источников электромагнитного излучения от печатной платы в ближней зоне. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.9>