

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.2.002

УДК 537.877

Электродинамическая компьютерная модель работы устройства обнаружения металлических стержней в бетонной конструкции

К. М. Зейде ✉, **М. В. Ронкин**, **А. А. Калмыков**Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

✉ k.m.zeyde@urfu.ru

Аннотация

Целью настоящей работы является описание обобщенной электродинамической модели работы специфического устройства, которое обеспечивает обнаружение и измерение геометрических характеристик арматурного каркаса в бетонной конструкции. Результатом настоящего исследования является оптимальная по ряду параметров конструкция приемно-передающего тракта устройства, а также алгоритм обработки сигналов, основанный на работе искусственной нейронной сети, обученной на выходных данных обобщенной компьютерной модели. Кроме основного функционала разрабатываемого устройства, заключающегося в структуроскопии методом радиолокационной голографии, в процессе его работы могут быть получены дополнительные, полезные характеристики цели: электрофизические параметры бетона, дефекты конструкции, визуализация объекта и т. д. Для решения поставленной задачи на основе общих радиолокационных принципов режимом работы излучателя была выбрана линейная частотная модуляция. Для создания электродинамической модели была использована среда автоматизированного проектирования Pathwave EM Design (EMPro) 2021. Разработанная обобщенная модель может быть оптимизирована по большому количеству параметров. Кроме положения и количества приемных антенн, в списке переменных оптимизации могут быть параметры передающей антенны (ширина диаграммы направленности, коэффициент направленного действия, расстояние ближней зоны) их количество (т. е. разрядность ММО системы), мощность на передающей стороне и т. д. В качестве основного результата приводится предлагаемая схема устройства.

Ключевые слова

электродинамическое моделирование, распространение электромагнитных волн, структуроскопия, линейная частотная модуляция, бетон, ММО

Для цитирования

Зейде К. М., Ронкин М. В., Калмыков А. А. Электродинамическая компьютерная модель работы устройства обнаружения металлических стержней в бетонной конструкции. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):104–118. DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.002.

Electrodynamic computer model of a metal rod in a concrete medium detection

K. M. Zeyde ✉, **M. V. Ronkin**, **A. A. Kalmykov**

Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ k.m.zeyde@urfu.ru

Abstract

The main aim of the present work is to describe a generalized electrodynamic model of the specific device operation, which provides detection and measurement of the geometric characteristics of the reinforcement cage in a concrete structure. The result of this study is the design of the device's receiving-transmitting path that is optimal in a number of parameters, as well as a signal processing algorithm based on the operation of an artificial neural network trained on the generalized computer model output data. In addition to the main functionality of the device being developed, which consists in structureroscopy by the method of radar holography, useful target characteristics may be obtained during its operation: electrophysical parameters of concrete, structural defects, visualization of an object, etc. To solve this problem, on the basis of general radar principles, frequency-modulated continuous-wave was chosen as the operating mode of the device. To create an electrodynamic model, the computer-aided design environment Pathwave EM Design (EMPro) 2021 was used. The developed generalized model may be optimized for a large number of parameters. In addition to the position and number of receiving antennas, the list of optimization variables may include parameters of the transmitting antenna (ray width, directivity, near-field distance), their number (i.e., the capacity of the MIMO system), power on the transmitting side, etc. The proposed scheme of the device is presented as the main result.

Keywords

electromagnetic modeling, electromagnetic propagation, structureroscopy, frequency-modulated continuous-wave, concrete, MIMO

For citation

Zeyde K. M., Ronkin M. V., Kalmykov A. A. Electrodynamic computer model of a metal rod in a concrete medium detection. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):104–118. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.2.002.

Введение

Принципы и подходы осуществления бесконтактной диагностики, дефекто- и структуроскопии, а также детектирования целевых объектов наблюдения в большинстве своем либо являются результатами модельных исследований, либо верифицируются ими. В данной работе формулируется актуальная задача обнаружения металлических объектов характерной формы (стальные арматурные стержни, каркас) в толще бетонной конструкции. Результатом настоящего исследования является оптимальная по ряду параметров конструкция приемно-передающего тракта устройства, а также алгоритм обработки сигналов, основанный на работе искусственной нейронной сети, обученной на выходных данных обобщенной компьютерной модели.

Наиболее полный обзор использования радиомониторинга в гражданской промышленности представлен в [1]. Близкие задачи, но в несколько другом приложении были сформулированы в работах [2–4]. Важно отметить, что обнаружение малых возмущений электродинамической системы обычно может осуществляться с использованием теории возмущений [5] для решения обратных задач детектирования [6]. Данный подход был успешно применен автором в предметном исследовании характерных возмущений нагруженного объемного резонатора [7], а также для обнаружения малых идентичных друг другу идеально проводящих рассеивателей в однородной среде [8].

В разрабатываемом устройстве динамический диапазон на приемной стороне, в любом случае, на несколько порядков шире описанных выше примеров, так как должен включать в себя как малые по магнитуде проявления наличия цели в среде, так и большие, существенно выходящие за рамки теории возмущений. Такая гибкость в обнаружении цели может быть достигнута либо с помощью использования комбинации различных алгоритмов обработки радиолокационных сигналов, либо с применением искусственной нейронной сети, обученной на большом наборе разнообразных данных. В каждом из этих случаев аппаратная часть устройства, равно как и его геометрия, должна обеспечивать все требуемые режимы работы. Кроме его основного функционала, заключающегося в структуроскопии методом радиолокационной голографии, в процессе измерения могут быть получены дополнительные полезные характеристики цели: электрофизические параметры бетона, дефекты конструкции, визуализация объекта и т. д.

Создание модели

Общая геометрия модели показана на рис. 1. В начале прямоугольной системы координат расположен электрический диполь как элементарный излучатель электромагнитных волн. На некотором расстоянии d (это расстояние соответствует нескольким длинам волн на центральной частоте) располагается препятствие – бетонная стена толщиной t и высотой H . Внутри этой стены имеется один или несколько особым образом расположенных металлических стержней с радиусом a . Задача ставится не только в детектировании самого арматурного каркаса, но также в определении его конфигурации и геометрических параметров стержней. Информация собирается в некоторой точке p , в которой может располагаться приемная антенна (при моделировании этих точек может быть несколько).

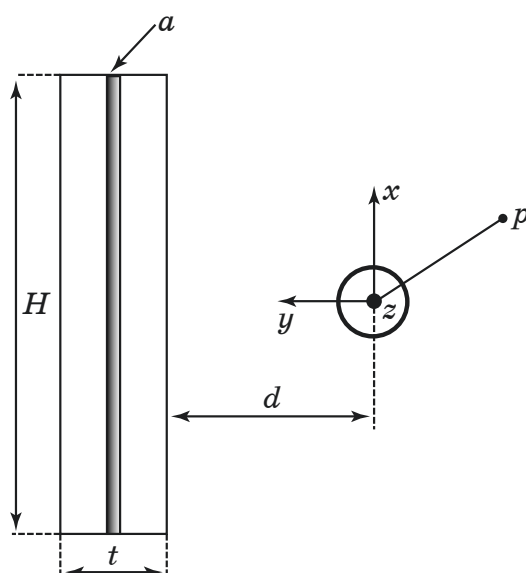


Рис. 1. Геометрия модели

Fig. 1. Model geometry

Для решения поставленной задачи на основе общих радиолокационных принципов режимом работы излучателя была выбрана линейная частотная модуляция (ЛЧМ). Ко всему прочему у авторов имеется разработанный алгоритм повышенной точности для обработки ЛЧМ-сигналов [9; 10], однако примененный в несколько другом приложении, но имеющий научный и технический потенциал оказаться полезным и для настоящей задачи. Частотный диапазон ЛЧМ: 2–5 ГГц, был выбран исходя из возможности проведения натурального верифицирующего модель исследования.

Для создания электродинамической модели была использована среда автоматизированного проектирования Pathwave EM

Design (EMPro) 2021. Основная причина такого выбора заключается в том, что автором была разработана и экспериментально верифицирована методика моделирования сложных диэлектрических структур в этой среде [2; 11]. Кроме того, EMPro FDTD решатель позволяет проводить эффективное моделирование во временной области, что особо важно при использовании ЛЧМ [12]. На рис. 2 показана первичная компьютерная модель: изображена диаграмма направленности диполя на центральной частоте 3,5 ГГц, бетонный блок без металлических стержней с размерами $100 \times 100 \times 245$ мм, располагающийся на расстоянии $d = 4\lambda_c$, где λ_c – длина волны на центральной частоте.

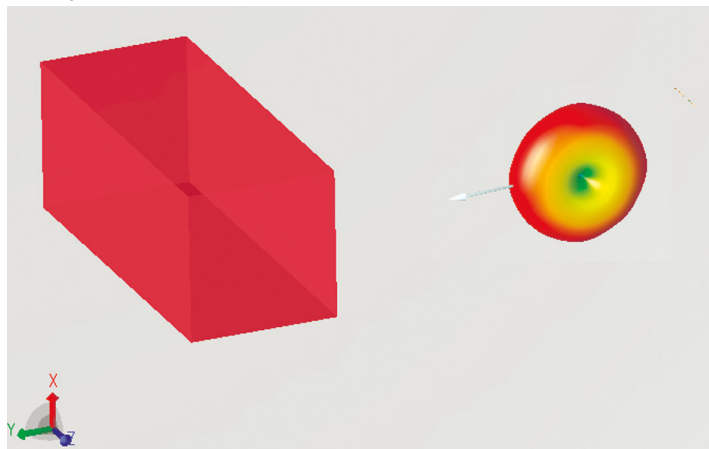


Рис. 2. Изучаемая модель в EMPro

Fig. 2. Model under study in EMPro

Электрофизические параметры бетона, верифицированные экспериментом, мы заимствуем из работы [13]. В целом мы имеем дело с некоторой дисперсионной характеристикой, которая может быть успешно описана причинностными моделями. Укажем, что согласно [13], величина $\text{Re}(\epsilon)$, в диапазоне частот 2–5 ГГц, изменяется в пределах значений [6.3 ; 6.1], а $\text{Im}(\epsilon)$: [0.68 ; 0.50]. Для обоснованного выбора типа описания данной среды в рамках электродинамической модели используем подход, предложенный в [11]. Так, наиболее точно дисперсионную характеристику мы можем описать по форме Джорджевича [14]:

$$\epsilon_r(f) = \epsilon_\infty + a_p \cdot \ln \frac{f_H + j \cdot f}{f_L + j \cdot f}. \quad (1)$$

Главным преимуществом использования (1), по сравнению с другими причинностными моделями, является достаточно простая, быстрая и точная, перестройка на другой частотный диапазон, что особо удобно при проведении моделирования во временной области и использования ЛЧМ на передатчике. Если модуляция происходит в рамках частотного диапазона, для ко-

того имеются измеренные (или интерполированные) значения электрофизических параметров бетона из [13], то f_H – максимальная частота, f_L – минимальная частота, a_p – параметр оптимизации (его значение зависит от типа материала, влажности и т. д.), ε_∞ – комплексное значение диэлектрической проницаемости среды для частоты f_H . Как показано выше, интересующий нас диапазон $f_L = 2$ ГГц, $f_H = 5$ ГГц, $\varepsilon_\infty = 6,1 - 0,5j$. Укажем, что вариации в (1) могут служить дополнительным источником информации относительно среды распространения зондирующего сигнала, такой как влажность ([13; 15–17]), пористость, неоднородности и различного рода включения в бетон.

Как указывалось выше, одной из сопутствующих задач при работе устройства, может являться определение влажности бетона. Существуют отдельные технические решения таких измерителей. В работе [13] описывается измерительная установка для определения электрофизических параметров бетонного блока антенным методом. В представленном исследовании используются широкополосные двугребенчатые рупорные антенны, расположенные по разным сторонам бетонной конструкции, т. е. обработке подвергается не отраженный сигнал, а прошедший сквозь среду, получение которого на практике часто оказывается трудновыполнимо.

В статье [15] описывается устройство для определения влажности бетонной конструкции с использованием резонансного метода. СВЧ объемный резонатор нагружается на бетонную конструкцию и по известным соотношениям (смещение резонансной частоты и изменение добротности резонатора), авторы предлагают восстанавливать диэлектрические параметры бетона, которые известным образом зависят от концентрации воды в его порах. Данный метод нельзя в полной мере считать бесконтактным, и он не может быть использован вместе с антенными измерениями.

В рамках настоящей работы, а также для модели, показанной на рис. 2, важным является исследование, описанное в [16]. В этой статье авторы изучают вносимые влагой электромагнитные потери при распространении радиоволн в бетонной конструкции. Таким образом, имеется возможность проводить измерения концентрации воды по принимаемой мощности отраженного сигнала от бетонного блока.

В статье [17] приводится описание устройства подповерхностной радиолокации для определения влажности бетонного блока. Авторы исследования предлагают использовать антенну, работающую на частоте 1.6 ГГц, и итеративный метод измерения: снимать характеристики образца в трех симметричных точках

на двух ортогональных поляризациях, что тоже соответствует разрабатываемой нами обобщенной модели. Обработка данных в предложенном случае осуществляется путем сравнения вейвлет-характеристик «сухого образца» с измеряемым. Непосредственно влажность бетона измеряется по времени пролета луча в анализируемой среде.

В модели, показанной на рис. 2, точки наблюдения p расположены в следующих координатах: $p_1 = (\lambda_c, 0, 0)$, $p_2 = (0, 2\lambda_c, 0)$, $p_3 = (0, 0, 2\lambda_c)$ и являются точечными сенсорами напряженности электрического поля. На границы системы анализа наложены краевые условия поглощения идеально согласованным слоем PML(7) [18]. На рис. 3 показан спектр ЛЧМ-сигнала, подаваемого на передатчик.

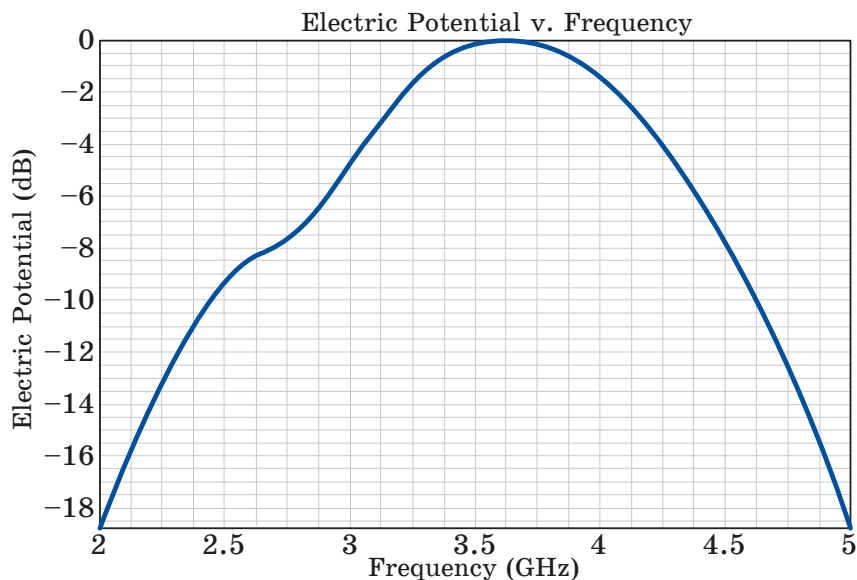


Рис. 3. Спектр сигнала ЛЧМ на передатчике
Fig. 3. The spectrum of the signal at the transmitter

Согласно поставленной задаче, в кубоид с электрофизическими параметрами (1) помещается один или несколько цилиндров, выполняющих роль стальной арматуры. Руководствуясь открытой документацией и ГОСТом, при строительстве применяются стержни диаметром 6–80 мм. Таким образом, пределы изменения параметра a соответствуют этому диапазону значений.

Следует указать, что данная модель может быть оптимизирована по большому количеству параметров. Кроме положения и количества приемных антенн (точки p), в списке переменных оптимизации могут быть параметры передающей антенны (ширина диаграммы направленности, коэффициент направленного действия, расстояние ближней зоны) их количество (т. е. разрядность ММО системы), мощность на передающей стороне и т. д.

Выходные данные модели

В качестве примеров покажем основные данные, получаемые при работе модели. На рис. 4 показан спектр (после быстрого преобразованию Фурье) в точке p_1 для трех случаев: отсутствие стержня в бетоне, $a = 6$ мм и $a = 40$ мм. Причем материалом стержня является идеальный проводник, и он располагается в центре кубоида (см. рис. 1), проходя его насквозь. Важно отметить, что на рис. 4 показан только тот диапазон частот, где магнитуда эффекта может быть визуально определена. Тогда как на рис. 5 и 6 показаны спектры тех же самых ситуаций только в точках p_2 и p_3 соответственно.

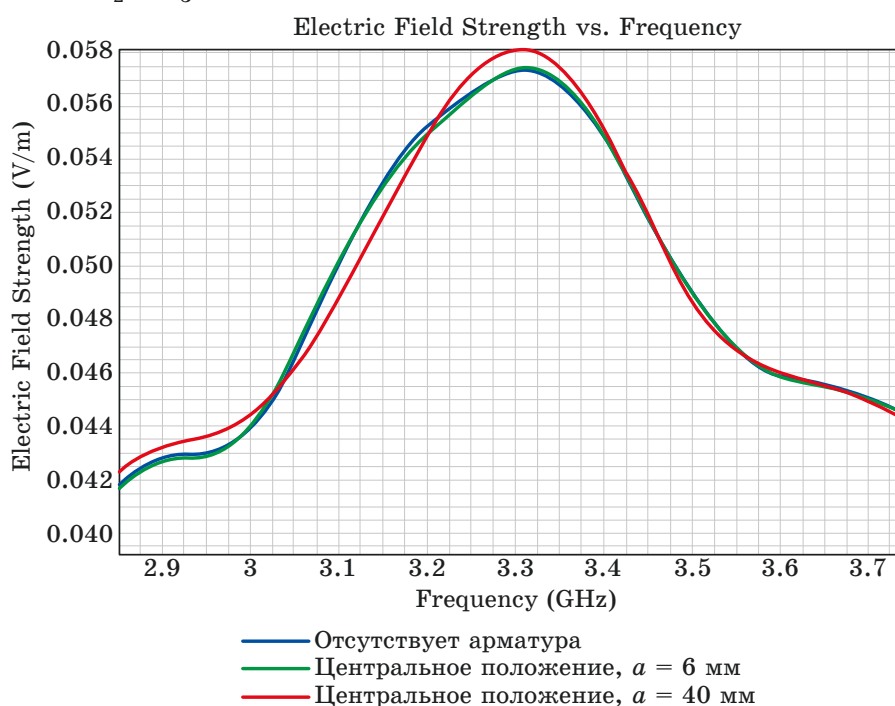


Рис. 4. Спектр сигнала в точке наблюдения p_1 , центральное положение стержня

Fig. 4. Signal spectrum at observation point p_1 , rod's central position

Представленные зависимости (рис. 4–6) для произвольных конфигураций арматурного каркаса в бетонной конструкции на каждом приемнике MIMO системы являются основными выходными данными модели. Именно по этим данным проводится как оптимизация самого устройства, так и обучение нейронной сети для решения обратной задачи. Характеристики обрабатываются как качественно, на предмет появления характерных особенностей в них, так и количественно – для формирования схемы измерения максимизирующей магнитуду полезного эффекта.

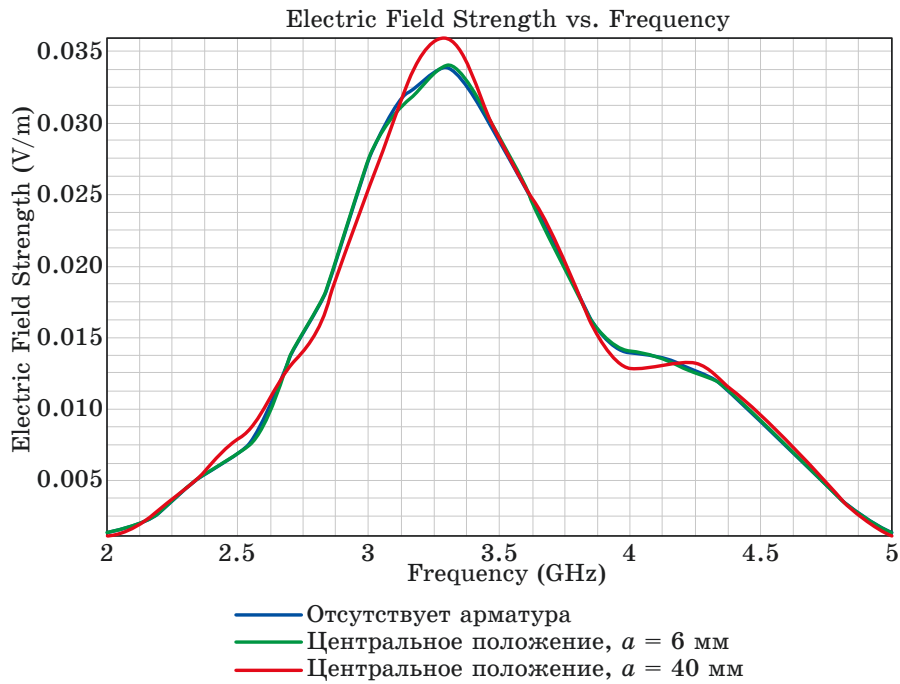


Рис. 5. Спектр сигнала в точке наблюдения p_2 , центральное положение стержня

Fig. 5. Signal spectrum at observation point p_2 , rod's central position

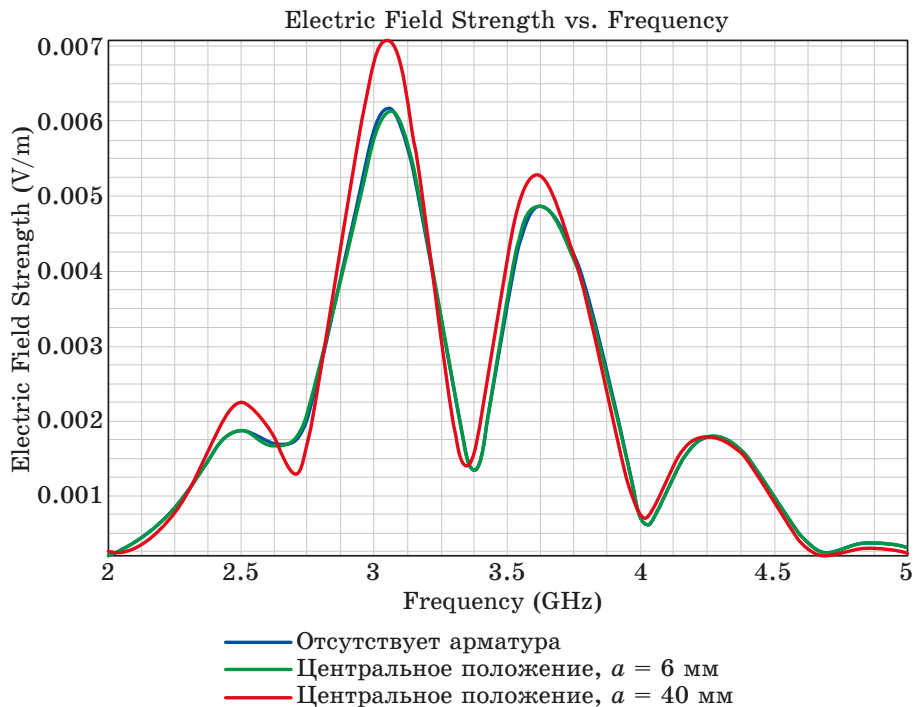


Рис. 6. Спектр сигнала в точке наблюдения p_3 , центральное положение стержня

Fig. 6. Signal spectrum at observation point p_3 , rod's central position

Согласно данным, показанным на рис. 4–6, наиболее информативным направлением для размещения приемника является ось z , т. е. фактически соосное положение передатчика и приемника. Одновременно с этим приемник, расположенный в ортогональном направлении, имеет большую магнитуду эффекта на центральной частоте модуляции, а следовательно, будет обеспечивать более надежное детектирование цели. Оптимизация конструкции устройства проводится для изначально выбранной геометрии рамы, на которой будет располагаться MIMO система.

Как уже было отмечено выше, предложенная в настоящей работе модель электродинамической системы может быть эффективно использована для накопления данных о ее состоянии при изменении ее параметров. Возможности такого подхода рассматривались ранее [19–21]. На рис. 7 показана схема первого этапа оптимизации предлагаемого устройства обнаружения. На рисунке показана квадратная рама, на которой расположены идентичные друг другу блоки передающих антенн (TX), и блоки приемных антенн (RX), соответственно.

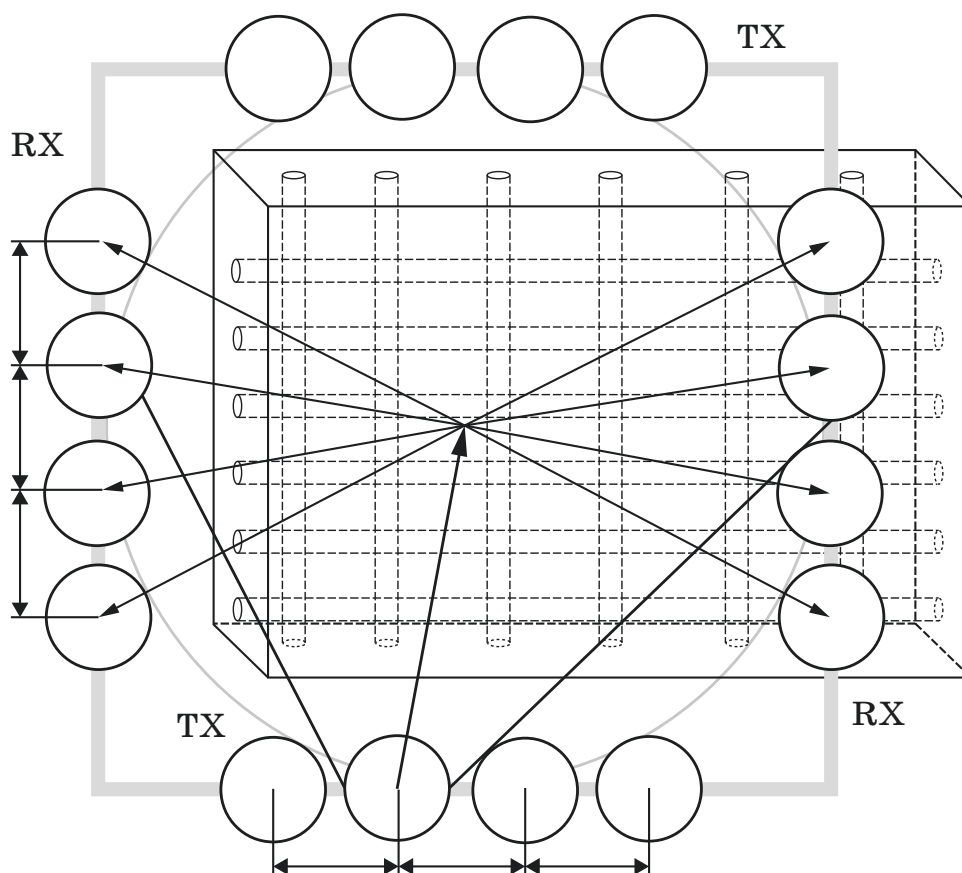


Рис. 7. Схематичное представление устройства обнаружения
Fig. 7. Schematic representation of a device

На рис. 7 стрелками показан ход падающего и множества отраженных от облучаемой цели лучей. Расстояние между антеннами выбирается по следующим критериям (которые тоже могут быть оптимизированы):

- ширина главного лепестка диаграммы направленности отдельного излучателя;
- уровень боковых лепестков отдельного излучателя;
- уровень электромагнитной развязки между изолированными каналами системы.

Оптимизация данных критериев должна обеспечить необходимую диаграмму направленности антенной системы и минимизировать прием электромагнитной мощности из паразитных направлений.

Заключение

В данной статье мы описали обобщенную электродинамическую модель, причина разработки которой в первую очередь заключается в необходимости оптимизации конструкции устройства по обнаружению и измерению геометрических параметров металлического арматурного каркаса в бетонном монолите. Сопутствующая оптимизации задача заключается в накоплении выходных данных модельных исследований для обучения искусственной нейронной сети, которая бы, вне зависимости от используемых алгоритмов обработки информации, существенно бы расширяла доступный функционал устройства, в состав которого она бы была включена. В процессе создания модели были рассмотрены следующие вопросы: электрофизические параметры бетона, их зависимость от частоты и влажности; масштабы ММО системы, количество приемо-передающих каналов, их взаимное расположение; различная конфигурация и геометрия арматурного каркаса в бетонной стене. Главными выводами такого рассмотрения явились, во-первых, возможность учета или синхронного измерения влажности бетона при детектировании арматурного каркаса в нем. Во-вторых, оптимальная по ряду параметров ММО система, работающая в режиме ЛЧМ. Оптимальность системы определялась как по количеству пространственных каналов, так и по их взаимной конфигурации.

Список литературы

1. Lai W.W., Derobert X., Annan P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT & E International*. 2018;96:58–78. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.04.002
2. Zeyde K.M., Hong D., Vardugina A.Yu., Mitelman Yu.E. EM perturbation of the single point PEC scatterer in multilayer structure for

GPR. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2020, Yekaterinburg, 14 May 2020*. Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020. P. 234–237. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117738

3. Na Li, Hong D., Wei Han, Qing Huo Liu. An analytic algorithm for electromagnetic field in planar-stratified biaxial anisotropic formation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020;58(3):1644–1653. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2947279

4. Caorsi S., Massa A., Pastorino M., Raffetto M., Randazzo A. Detection of buried inhomogeneous elliptic cylinders by a memetic algorithm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003;51(10):2878–2884. DOI: 10.1109/TAP.2003.817984

5. Griesmaier R. A general perturbation formula for electromagnetic fields in presence of low volume scatterers. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*. 2011;45(6):1193–1218. DOI: 10.1051/m2an/2011015

6. Colton D., Piana M. The simple method for solving the electromagnetic inverse scattering problem: the case of TE polarized waves. *Inverse Problems*. 1998;14:597–614.

7. Зейде К.М. Исследование нагруженного на круглые отверстия прямоугольного резонатора в рамках теории возмущений. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):261–276. DOI: 10.15826/urej.2020.4.3.001.

8. Зейде К.М., Вардугина А.Ю., Марвин С.В. Быстрый метод анализа возмущения электромагнитного поля малыми сферическими рассеивателями. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020;12(5):1039–1050. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-5-1039-1050

9. Ronkin M.V., Kalmykov A.A., Zeyde K.M. Novel FMCW-interferometry method testing on an ultrasonic clamp-on flowmeter. *IEEE Sensors Journal*. 2020;20(11):6029–6037. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2972604

10. Ронкин М.В., Калмыков А.А. Анализ особенностей обработки сигналов ультразвуковых расходомеров с линейно-частотно модулированным излучением. *Ural Radio Engineering Journal*. 2018;2(4):52–66. DOI: 10.15826/urej.2018.2.4.004

11. Zeyde K.M. Verified simulation of waveguide inhomogeneities in Keysight EMPro 2017 software. *Ural Radio Engineering Journal*. 2018;2(4):67–76. DOI: 10.15826/urej.2018.2.4.005

12. Kunz K.S., Luebbers R.J. *The finite difference time domain method for electromagnetics*. CRC Press; 1993. 464 p. DOI: 10.1201/9780203736708

13. Olkkonen M.K., Mikhnev V., Huuskonen-Snicker E. Complex Permittivity of Concrete in the Frequency Range 0.8 to 12 GHz. In: *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Gothenburg, Sweden, April 8–12, 2013. P. 3319–3321.

14. Djordjevic A., Olcan D., Stojilovic M., Pavlovic M., Kolundzija B., Tosic D. Causal models of electrically large and lossy dielectric bodies. *Facta Universitatis*. 2014;27(2):221–234. Available at: <http://facta.junis.ni.ac.rs/eae/fu2k142/eae140204.pdf>

15. Olkkonen M.-K., Mikhnev V., Huuskonen E. RF moisture measurement of concrete with a resonator sensor. In: *22nd International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, September 10–14, 2012*. IEEE; 2012. P. 853–854. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6336221>

16. Ji S., Chung K.L., Zhang C. Optimal bandwidth of concrete embedded antenna for wireless power transmission. In: *IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, Nanjing, May 16–18, 2016*. IEEE; 2016. DOI: 10.1109/iWEM.2016.7505029

17. Wutke M.K. Use of Ground Penetrating Radar measurement combined to resistivity measurement for characterization of the concrete moisture. In: *17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 2018.

18. Berenger J.-P. Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1996;44(1):110–117.

19. Hamid A.-K., AlSunaidi M. Inverse scattering by dielectric circular cylindrical scatterers using a neural network approach. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Montreal, Kanada, July 13–18, 1997*. IEEE; 1997. Vol. 4, pp. 2278–2281.

20. Веремьев В.И., Шинь Ч.С. Использование диаграммы рассеяния цели в задачах радиолокационного распознавания. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2006;(5):62–68.

21. Зейде К.М. Программная автоматизация алгоритма восстановления электрофизических параметров объекта в САПР EMPro. В: *Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов 26-й международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 29 сентября – 1 октября 2020 г.* Воронеж: Воронежский государственный университет; 2020. Т. 6. С. 134–139.

References

1. Lai W.W., Derobert X., Annan P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT & E International*. 2018;96:58–78. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.04.002

2. Zeyde K.M., Hong D., Vardugina A.Yu., Mitelman Yu.E. EM perturbation of the single point PEC scatterer in multilayer structure for GPR. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2020, Yekaterinburg, 14 May 2020*. Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020, pp. 234–237. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117738

3. Na Li, Hong D., Wei Han, Qing Huo Liu. An analytic algorithm for electromagnetic field in planar-stratified biaxial anisotropic formation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020;58(3):1644–1653. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2947279

4. Caorsi S., Massa A., Pastorino M., Raffetto M., Randazzo A. Detection of buried inhomogeneous elliptic cylinders by a memetic algorithm. *IEEE*

Transactions on Antennas and Propagation. 2003;51(10):2878–2884. DOI: 10.1109/TAP.2003.817984

5. Griesmaier R. A general perturbation formula for electromagnetic fields in presence of low volume scatterers. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*. 2011;45(6):1193–1218. DOI: 10.1051/m2an/2011015

6. Colton D., Piana M. The simple method for solving the electromagnetic inverse scattering problem: the case of TE polarized waves. *Inverse Problems*. 1998;14:597–614.

7. Zeyde K.M. A case study of a loaded rectangular resonator with circular holes under the cavity perturbation theory. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):261–276. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2020.4.3.001.

8. Zeyde K.M., Vardugina A.Yu., Marvin S.V. Fast method for analyzing the electromagnetic field perturbation by small spherical scatterer. *Computer Research and Modelin*. 2020;12(5):1039–1050. (In Russ.) DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-5-1039-1050

9. Ronkin M.V., Kalmykov A.A., Zeyde K.M. Novel FMCW-interferometry method testing on an ultrasonic clamp-on flowmeter. *IEEE Sensors Journal*. 2020;20(11):6029–6037. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2972604

10. Ronkin M.V., Kalmykov A.A. Analysis of processing features of ultrasonic flowmeters with FMCW signals. *Ural Radio Engineering Journal*. 2018;2(4):52–66. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2018.2.4.004

11. Zeyde K.M. Verified simulation of waveguide inhomogeneities in Keysight EMPro 2017 software. *Ural Radio Engineering Journal*. 2018;2(4):67–76. DOI: 10.15826/urej.2018.2.4.005

12. Kunz K.S., Luebbers R.J. *The finite difference time domain method for electromagnetics*. CRC Press; 1993. 464 p. DOI: 10.1201/9780203736708

13. Olkkonen M.K., Mikhnev V., Huuskonen-Snicker E. Complex Permittivity of Concrete in the Frequency Range 0.8 to 12 GHz. In: *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Gothenburg, Sweden, April 8–12, 2013, pp. 3319–3321.

14. Djordjevic A., Olcan D., Stojilovic M., Pavlovic M., Kolundzija B., Tosic D. Causal models of electrically large and lossy dielectric bodies. *Facta Universitatis*. 2014;27(2):221–234. Available at: <http://facta.junis.ni.ac.rs/eae/fu2k142/eae140204.pdf>

15. Olkkonen M.-K., Mikhnev V., Huuskonen E. RF moisture measurement of concrete with a resonator sensor. In: *22nd International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, Sevastopol, September 10–14, 2012*. IEEE; 2012, pp. 853–854. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6336221>

16. Ji S., Chung K.L., Zhang C. Optimal bandwidth of concrete embedded antenna for wireless power transmission. In: *IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, Nanjing, May 16–18, 2016*. IEEE; 2016. DOI: 10.1109/iWEM.2016.7505029

17. Wutke M.K. Use of Ground Penetrating Radar measurement combined to resistivity measurement for characterization of the concrete moisture. In: *17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 2018.

18. Berenger J.-P. Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1996;44(1):110–117.

19. Hamid A-K., AlSunaidi M. Inverse scattering by dielectric circular cylindrical scatterers using a neural network approach. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Montreal, Kanada, July 13–18, 1997*. IEEE; 1997, vol. 4, pp. 2278–2281.

20. Veremyev V.I., Trinh Xuan Sinh. Using of the target scattering indicatrix in tasks of radar-tracking recognition. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2006;(5):62–68. (In Russ.)

21. Zeyde K.M. Software automatization algorithm for electrophysical object parameters reconstruction in ECAD EMPro. In: *RLNC Conf. Proc., Voronezh, September 29 – October 1, 2020*. Voronezh: Voronezh State University; 2020. Vol. 6, pp. 134–139. (In Russ.)

Информация об авторах

Зейде Кирилл Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, k.m.zeyde@urfu.ru.

Ронкин Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, m.v.ronkin@urfu.ru.

Калмыков Алексей Андреевич, кандидат технических наук, профессор департамента радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, alexey.kalmykov@urfu.ru.

Information about the authors

Kirill M. Zeyde, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Communications of Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, k.m.zeyde@urfu.ru.

Mikhail V. Ronkin, Candidate of Science in Technology, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Communications of Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, m.v.ronkin@urfu.ru.

Alexey A. Kalmykov, Candidate of Science in Technology, Professor of the Department of Radioelectronics and Communications of Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, alexey.kalmykov@urfu.ru.

Поступила / Received: 28.05.2021

Принята в печать / Accepted: 09.06.2021