УДК 550.8.013

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАЮЩЕГО АППАРАТА

С.В. Каляшин, А.Н. КарпукГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ДУБНА»

В данной статье авторы рассматривают возможность применения метода теории электромагнитного поля, для математического моделирования электронной структуры геологоразведочных комплексов на основе беспилотного летающего аппарата.

Ключевые слова: БПЛА, метод теории электромагнитного поля, электромагнитное поле, георадиолокация, энергоэффективность, массогабаритность.

На сегодняшний день беспилотные летающие аппараты (БПЛА, беспилотник, дрон) заняли особую нишу в области геосистемного мониторинга. Применение БПЛА эффективно при фото и видео съемках линейных объектов, инвентаризации и кадастре объектов недвижимости, картографирования (рис. 1), для получения информации при чрезвычайных ситуациях. Но в направлениях геологоразведки и геофизики БПЛА еще не раскрыл свой полный потенциал и КПД [5, 6].

Проектирование комплексов для повышения геологопоисковых работ в сложных природно-ландшафтных условиях – одна из приоритетных задач разработчиков, и при успешном ее решении, мир получит роботизированные низковысотные беспилотные комплексы, которые заменят традиционную пешеходную геологоразведку и дорогостоящую аэрогеофизику. Одной из основных научно-технических проблем данного направления является интеграция БПЛА с зондирующими радиоэлектронными модулями и электронно-вычислительной аппаратурой, работающей в реальном масштабе времени. Это обусловлено ограничениями в области энергопотребления и грузо-

MATHEMATICAL MODELING OF THE ELECTRONIC STRUCTURE USING ELECTROMAGNETIC FIELD THEORY METHODS FOR EXPLORATION SYSTEMS BASED ON UAVS

S.N. KALYASHIN, A.N. KARPUK

UNIVERSITY OF DUBNA

In this article, the authors consider the possibility of using the method of electromagnetic field theory for mathematical modeling of the electronic structure of exploration systems on UAVs.

KEYWORDS: UAV, electromagnetic field theory method, electromagnetic field, georadar, energy efficiency, mass and size.

DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-1-3-7

подъемности дрона. Беспилотники, нагруженные антеннами или радарами (рис. 2), как полезной нагрузкой не осуществляют должным образом эффективное преобразование энергии электромагнитного поля (ЭМ), использующиеся электронные приборы (ЭП), в силу своего низкого быстродействия «не успевают» выполнять прием, передачу и обработку информации в реальном масштабе времени, следствием вышеизложенного является высокое энергопотребление, малая продолжительность полета, а также реализация подповерхностного зондирования низкого качества из-за больших электродинамических потерь в средах [5, 6, 8]. Информация, полученная после обработки пользователем, зачастую является искаженной или вовсе недостоверной. Из этого следует, что решение междисциплинарных научно-технических задач в области прием-передачи сигнала, зондирующего грунт, энергоэффективности и быстродействия всей электродинамической системы, является трудоемким и актуальным направлением, при создании автоматизированного комплекса для геологоразведочных работ.

Вышеупомянутые образцы, являющиеся полезной нагрузкой дрона, основываются на математических

РИС. 1.

Снимок, полученный БПЛА и наложенный на карту с портала Google.map

моделях принципа независимости действия и численном решении дифференциальных уравнений, графическом анализе, либо компьютерном расчете колебательных электрических процессов методом фазовой плоскости [7]. Такие модели позволяют установить только качественное соответствие между типом ЭП, схемой включения и его реакцией даже на заданное гармоническое воздействие. Следует учитывать, что свойства каждой такой конструктивной единицы в ЭМ-поле характеризуются композицией амплитудно-зависимых функций различного вида и их производных, что не дает возможность первоначально применить программы машинного анализа переходных процессов, прогнозировать стационарные и неустойчивые энергетические состояния. Кроме того, возникает непростая проблема перехода, например, от естественных синергетических принципов к количественным соотношениям [1].

Конструкции таких устройств спроектированы на чрезмерных идеализациях и упрощениях, раздельном рассмотрении свойств ЭП и соединений, без одновременного учета влияния инерционности генерации и рекомбинации носителей тока, накопления и обмена ЭМ-энергией компонентами в ходе ее транспортировки [2]. Они носят относительно универсальный характер и решают достаточно общие задачи, но игнорируют изменение интенсивности сигналов, требование коллинеарности векторов скорости зарядов и напряженности поля, что в свою очередь абсолютно недопустимо для интеграции с БПЛА, поскольку определяющими характеристиками таких устройств являются быстродействие, миниатюризированные массогабаритные параметры, оптимизированное энергопотребление.

Известно, что при создании любой электродинамической системы энергетические характеристики и процессы электромагнитного (ЭМ) поля являются определяющим фактором. Основной целью при интеграции георадиолокационного модуля с БПЛА явля-

С.В. КАЛЯШИН, А.Н. КАРПУК
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ
БЕСПЛОТНОГО ЛЕТАЮЩЕГО АППАРАТА

РИС. 2.

БПЛА с георадаром в роли полезной нагрузки

ется организация взаимодействия ЭП с последующим увеличением КПД преобразования мощности постоянного тока в энергию сигнала при минимальных значениях энергопотребления и массогабаритности.

На сегодняшний день реализовать выполнение вышеизложенных задач можно, используя полупроводниковую электронно-компонентную базу СВЧ диапазона. Проектирование конструкции георадиолокационного модуля с помощью радиоэлементов, выполненных по наноразмерному технологическому процессу, обеспечит геометрическую миниатюризацию и сверхбыстродействие в получении и обработке данных.

Поскольку современная микроэлектроника шагнула далеко вперед в технологии масштабирования, потенциал уже имеющихся техпроцессов не раскрыт. С помощью технологического процесса 32нм, который долгое время используется в России, можно проектировать и разрабатывать сверхбыстродействующую электронику с малыми массогабаритными значениями. В виде примера рассчитаем тактовую частоту транзистора, созданного по техпроцессу 32нм. Время пролета электрона от истока к стоку описывается следующим выражением

$$\tau = \frac{L}{v_{нас}} \quad (1)$$

где $v_{нас}$ – скорость насыщения электрона, типичным значением которого является $1,8 \times 10^6$ см/с; L – эффективная длина канала технологии 32нм (рис. 3)

Так для данного транзистора время пролета получим равным:

$$\tau = \frac{L}{v_{нас}} = \frac{28 \times 10^{-9}}{1,8 \times 10^3} = 15,5 \times 10^{-12} \text{ с} \quad (2)$$

Рис. 3.

Сечение структуры ЭП с технологическим процессом 32нм и эффективной длиной канала транзистора 28нм

Для работы микросхемы в СВЧ диапазоне должно выполняться условие, что тактовая частота микросхемы имеет величину не меньшую, чем значение частоты подаваемого сигнала. Зная время пролета носителей заряда в рассматриваемом транзисторе, найдем для анализируемого элемента тактовую частоту и ее длину волны:

$$f = \frac{1}{(4 \times \tau)} = 16 \times 10^9 \text{ Гц} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0,18 \times 10^{-1} \text{ м} \quad (4)$$

Как видно из расчета, при техпроцессе 32нм тактовая частота ЭП соответствует характеристикам сверхбыстродействующих комплексов. Но проектирование множества приборов, работающих совместно в вышеуказанном диапазоне частот и длин волн, требует трудоемкий и междисциплинарный подход уже на этапе моделирования.

Целью исследования является поиск методов математического моделирования. Поскольку «кирпичиками» при конструировании георадиолокационного модуля будут современные полупроводниковые ЭП, то его электродинамическая модель не будет отличаться от других интегральных схем, использующих такую же электронно-компонентную базу, поскольку теория электроники и электротехники едина. Следует учитывать, что в совокупности ЭП создают электроэнергетическую сеть и обладают емкостью по отношению к заземленной поверхности и относительно друг друга. Поэтому мгновенное значение тока неодинаково вдоль межсоединений (проводники с помощью которых осуществляется запитка ЭП), так как его часть ответвляется в окружающую среду в виде

тока смещения [9]. Сами же межсоединения в свою очередь обладают емкостными свойствами и служат направляющими ЭМ-поля. Перечисленные факторы подтверждают сложность проектирования, поэтому следует ожидать больших трудностей уже на этапе математического моделирования.

Данные о суммарной реакции и воздействии многоэлементной структуры описываем на основе классической модели точечной микрочастицы, а электронного потока как среды распространения ЭМ-волн, характеризуемой следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \text{rot} H &= \delta, \text{div} D = \rho, \text{rot} E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0, \text{div} B = 0, \\ D &= \varepsilon \varepsilon_0 E, B = \mu \mu_0 H, \delta = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + \rho w. \end{aligned} \quad (5)$$

Также, целесообразно рассмотреть выражение объемной плотности ΔW ЭМ-энергии, решать уравнения Даламбера для векторного (магнитного) A и скалярного (электрического) ϕ потенциала поля в электронной среде [1–4]:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \frac{ED}{2} + \frac{HB}{2}, H = \text{rot} A, E = \text{rot} A', E = -\text{grad} \phi - \mu \mu_0 \frac{\partial A}{\partial t}, A = \frac{\partial Z_E}{\partial t}, \\ (\text{или } A' &= \frac{\partial Z_M}{\partial t}), \nabla^2 A - \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\rho w, \nabla^2 \phi - \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon} \end{aligned} \quad (6)$$

с помощью векторов Герца Z_E, Z_M , которые, как известно, моделируют электрический или магнитный диполь. С целью оценки КПД системы интегрированных друг с другом ЭП следует найти в явном виде законы синхронной вариации пространственного распределения плотности ρ объемного заряда электронов и векторов полного тока δ , напряженности E, H , индукции D, B электрического и магнитного полей. Механизм явлений в них дополнительно описывается в явном виде законом Кулона, уравнениями Лоренца и Рамо, учитывающими динамику изменения электрического состояния ЭП, находящихся на расстоянии r друг от друга, энергетический обмен между полем и зарядами за время взаимодействия t [1–2]:

$$\begin{aligned} F &= \frac{d(mw)}{dt} = e(E + [wB]) = \\ &= F_E + F_H, E = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} \frac{e}{4\pi r^2} \frac{1}{r}, \left| \frac{F_H}{F_E} \right| \leq \frac{w}{c}, \\ \Theta &= \omega t, i_{\text{нав}} = e \frac{E}{U} w. \end{aligned}$$

Здесь F – сила Лоренца, влияющая на движение заряда e и массой m в ЭМ-поле; w – вектор его мгновенного

венной скорости; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор; $\omega=2\pi/T$; T – круговая частота и период колебаний; Θ – угол пролета микрочастиц области взаимодействия. Параметры ϵ_0 , μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; ϵ , μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости веществ; c – скорость света, σ – удельная проводимость, характеризующая материал среды. Так как среднее значение w меньше величины с минимум на три порядка, а время t движения электронов должно быть соизмеримым с периодом колебаний ЭМ-поля, то, межсоединения в проектируемой структуре должны иметь упорядоченный вид фракталов или замедляющих систем. Исходная аналитическая модель (5) – (7) когерентной структуры справедлива для электронов с «классическим» радиусом $\sim 2 \times 10^{-15}$ м. Известно, что она теряет смысл благодаря квантовым процессам только в случае расстояний между частицами в потоке свободных зарядов порядка $(h/mc) \approx 2 \times 10^{-12}$ м, $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж $\times$ с – постоянная Планка ($1 \text{ Дж} \approx 6,24 \times 10^{18} \text{ эВ}$) [232]. При этом они выступают как точечные силовые центры, взаимодействующие друг с другом по кулоновскому закону. Эффект дискретизации электрических режимов ЭП проявляется, если величина кванта воздействия поля становится соизмеримой с энергией теплового движения носителей тока и не играет практической роли в современных изделиях электронной техники. В исследуемых диапазонах частот $f=1/T$ ЭМ-колебаний при реальных скоростях электронов, достижимая ими кинетическая энергия превышает величину hf , а максимальные значения составляющих силы Лоренца соотносятся следующим образом: $|F_E| \gg |F_H|$. Кроме того, второе слагаемое в уравнении движения (Лоренца) можно не учитывать, так как амплитуды электрического и магнитного полей волны, например, в свободном пространстве, связаны соотношением $|E| = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} |H|$ [7]. Следовательно, выражения (5) – (7) полностью применимы к устройствам, полупроводниковых приборов с электростатическим управлением, т.е. соответствуют исходным данным проектируемого быстродействующего малогабаритного модуля с последующей интеграцией его в БПЛА. Их амплитудно-зависимая структура образована «свободными», но «связанными» перемещающимися электронами.

Соотношения (5)–(7) в общем виде и единообразно описывают механизм процессов в потоке зарядов и веществе, окружающем ЭП, его направленную передачу – вектором Пойнтинга $S = \Delta W/v$ с конечной скоростью и запаздывание ЭМ-потенциалов. Совместно уравнения (5) – (7) составляют «макроскопическую» электродинамическую аналитическую модель конструктивной единицы изделия. Она учитывает работу поля по переносу электронов, преобразование энергии постоянного тока в энергию колебаний, явления интерференции и дифракции. Кроме того, система (5) – (7) исполняет роль исходной электротехниче-

С.В. КАЛЯШИН, А.Н. КАРПУК
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАЮЩЕГО АППАРАТА

ской модели в теории приборов и устройств когерентной электроники.

В данной статье авторы рассматривают возможность междисциплинарного подхода для проектирования малогабаритного георадиолокационного модуля для геологоразведочных комплексов на основе БПЛА. Одним из направлений на стадии моделирования электронной структуры является метод теории электромагнитного поля. Формулы (5) – (7) имеют конкретное аналитическое решение только при известных граничных и начальных условиях в областях структур, содержащих направленно движущиеся электроны. Они определяются изменением плотности ρ объемного заряда и скорости w свободных носителей тока в рядом расположенных ЭП, нелинейно зависящих от разности потенциалов U между электродами. Поэтому на начальном этапе теоретических исследований условий их взаимодействия основной интерес представляют амплитудно-пространственные свойства комплекса дискретных ЭП, варьируемые сигналом, а не конфигурация силовых и эквипотенциальных линий поля, типы волн в поперечном и продольном сечении конструкций. С другой стороны, уравнения (5) – (7) в дифференциальной форме только локально характеризуют корреляцию изменения поля и заряда в избранной точке изделий и моменты времени t , отличающиеся на некоторую величину, без конкретизации взаимного расположения, электрических связей и геометрии соседних приборов.

Следовательно, в разрабатываемых во всем мире геологоразведочных комплексах на основе БПЛА неправомерно говорить о непрерывном распределении заряда и тока в объеме взаимодействующих подвижных частиц, абстрагируясь от строения ЭМ-поля, и пользоваться только непрерывными функциями, аппаратом дифференциального и интегрального исчисления при интерпретации и прогнозировании электрических явлений в вакууме, газе и полупроводнике. Напомним, что сплошная активная или конденсированная среда – это математическая модель материи, когда есть достаточные основания отвлечься от того, что каждый из материальных объектов является веществом с дискретной структурой, своим атомным и молекулярным составом. Вместе с тем применение подобной «макроскопической» электродинамической модели материи, состоящей из заряженных тел или элементарных частиц, не исключается на последующих этапах проектирования математическим аппаратом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Анализ КПД зависимого источника волн напряжения и тока СВЧ // Наука и образование на рубеже тысячелетий: сборник научно-исследовательских работ. Вып. 1. Кисловодск: КГТУ, 2016. С. 139–148.
2. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Анализ

трансформирующих свойств СВЧ-структуры композиционного материала когерентной электроники // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №9. (170). С. 39–49.

3. ГОЛОВАНОВ О.А., МАКЕЕВА Г.С., ТУМАНОВ А.А. Математическое моделирование нелинейных устройств СВЧ методом нелинейных универсальных автономных блоков с каналами Флоке // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. №4. С. 64–72.
4. ЛЕБЕДЕВ И.В. Техника и приборы СВЧ /Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.
5. КАРПУК А.Н. Базовая концепция антенной решетки для комплекса «Георадар – Беспилотный летающий аппарат» // Сборник научных статей по итогам VIII Международной конференции «Передовые инновационные разработки, перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство». Казань, 2019. С. 4.
6. КАРПУК А.Н. Перспективы и преимущества «Георадар – Дрон» // Сборник научных статей по итогам XXVI Международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире». М., 2019. С. 3.
7. KASBAN, H., ZAHNAN, O., ELARABY, S.M., EL-KORDY, M., ABD EL-SAMIE, F.E. A Comparative Study of Landmine Detection Techniques// Sensing and Imaging: An International Journal. 2010. N11. P. 89–112.
8. COLORADO J., ET AL. An integrated aerial system for landmine detection: SDR-based ground penetrating radar onboard an autonomous drone// Advanced Robotics. 2017. Vol. 31. P. 791–808.
9. TAKAHAGI S., SHINYA H., ASAKAWA K., SAITO M., SUHARA M. Equivalent Circuit Model of Triple-Barrier Resonant Tunneling Diodes Monolithically Integrated with Bow-Tie Antennas and Analysis of Rectification Properties towards Ultra Wideband Terahertz Detections //Japanese Journal of Applied Physics. 2011. N 50 01BG01.

Каляшин Степан Валерьевич,
к.т.н., доцент кафедры общей и прикладной геофизики Государственного университета «Дубна»,

Карпук Александр Николаевич,
аспирант кафедры общей и прикладной геофизики Государственного университета «Дубна»,

✉ 141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19,
141982, Moscow Region, Dubna, ul. Universitetskaya 19,
тел: +7 (928) 907-97-63, e-mail: karpuk.alexandr@bk.ru