

ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 4 (65)
ОКТАБРЬ–ДЕКАБРЬ
2024



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 №90-р):

Физико-математические науки

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Технические науки

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

1.3.11 – Физика полупроводников

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу <http://journals.nstu.ru/doklady/rules>. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2024

октябрь – декабрь

№ 4 (65)

Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)

Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)

А. Загоскин, PhD (Великобритания)

Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)

М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)

К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.

И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.

А.О. Давидов, д-р техн. наук

Г.Н. Девятков, д-р техн. наук, проф.

В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.

С.Л. Елистратов, д-р техн. наук

А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.

И.Ф. Лозовский, д-р техн. наук, проф.

В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.

М.И. Низовцев, д-р техн. наук, проф.

О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.

В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф.

В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.

А.Н. Сычев, д-р техн. наук, проф.

С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.

С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г.
(свидетельство ПИ № ФС 77-81374 от 30.06.2021 г.)*

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346,
телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2024 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2024

October – December

№ 4 (65)

Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
G.N. Devyatkov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
I.F. Lozovskiy, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
M.I. Nizovtsev, D.Sc. (Eng.), Prof.
O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.N. Sychev, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073,
Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Зверев А.В., Ипатов Д.Е.

Особенности формирования синтетических изображений
радиометрических величин в ИК области спектра7

Киселев А.В., Тяуров А.В.

Ошибка установки углового положения радиолокационного
объекта, замещаемого двухточечной моделью,
при использовании антенны с разностной диаграммой
направленности15

Попов В.И.

Математические модели распространения радиоволн
в гетерогенных средах для беспроводных сетей. Обзор.
Часть 2. Математические модели распространения
радиоволн в лесах.....26

**В.Н. Васюков, М.А. Райфельд, Д.О. Соколова,
Б.Р. Таишанов, В.В. Павлов**
Обработка и анализ сигналов для диагностики состояния
эндопротеза тазобедренного сустава.....48

**М.Е. Шевченко, В.Н. Малышев,
С.С. Соколов, А.В. Осетров, А.С. Черепанов**
Устранение неоднозначности оценок направлений прихода
широкополосных сигналов в многосигнальном режиме
пеленгования.....64

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Zverev A.V., Ipatov D.E.

Features of radiometric quantities synthetic images formation
in the IR region of the spectrum.....7

Kiselev A.V., Tayurov A.V.

Error in setting the angular position of a radar object replaced
by a two-point model when using an antenna
with a difference radiation pattern15

Popov V.I.

Mathematical models of radio wave propagation
in heterogeneous environments for wireless networks. Review.
Part 2. Mathematical models of radio wave
propagation in forests26

CONTENTS

*Vasyukov V.N., Rajfeld M.A., Sokolova D.O.,
Tashtanov B.R., Pavlov V.V.*

Processing and analysis of signals for diagnosing the condition
of a hip joint endoprosthesis.....48

*Shevchenko M.E., Malyshev V.N., Sokolov S.S.,
Osetrov A.V., Cherepanov A.S.*

Elimination of ambiguity in estimates of the arrival directions
of broadband signals in multisignal bearing mode.....64

УДК 621.384.3

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА***А.В. Зверев, Д.Е. Ипатов***ООО «Мотив НТ»*

Физически корректные синтетические изображения трехмерных сцен в заданном диапазоне длин волн обладают высокой значимостью в решении ряда прикладных задач. В основе формирования таких данных лежит моделирование физических взаимодействий, в том числе распространения электромагнитного излучения в пространстве сцены. В данной работе представлены результаты разработки механизма трассировки лучей в программном комплексе моделирования трехмерных сцен. Предложенный алгоритм расчета излучательного теплопереноса программно реализован для исполнения на графических процессорах в виде шейдеров и позволяет учесть сигнал от множества тел на сцене. Каждый испущенный луч, имитирующий распространение электромагнитной волны, претерпевает не более двух взаимодействий с телами и вносит добавку к собственному излучению наблюдаемой площадки в виде числа фотонов в заданном диапазоне длин волн и телесном угле. Для оценки разработанного алгоритма был предложен ряд модельных сцен, на которых было проведено сравнительное исследование при моделировании ИК области спектра. Учет механизмов излучательного теплопереноса при формировании картин радиометрических величин позволяет качественно улучшить получаемые изображения и вносит значительный вклад в фоновый сигнал.

Ключевые слова: моделирование, гиперспектральный симулятор, графический процессор, трассировка лучей, ИК-спектр, излучательный теплоперенос.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-7-14

Введение

Подготовка физических данных в виде изображений виртуальной сцены в заданной области спектра представляет большой интерес в ряде исследовательских и прикладных задач ввиду значительной сложности, а, зачастую и, невозможности их получения на основе натуральных исследований. Это направление получило общее название гиперспектральная отрисовка изображений, в зарубежной литературе известное как Hyperspectral Imaging, HSI [1].

Симуляторы гиперспектральных данных выполняют расчет физически корректного взаимодействия электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, обычно, от ультрафиолета до длинноволнового участка ИК излучения, а результаты расчета являются основой для подготовки правдоподобных характерных сигналов различных объектов. Физически корректные данные с широким динамическим диапазоном величин используются в модельных исследованиях, например, в задаче обнаружения болезней растений в сельском хозяйстве [2], обнаружения и раннего предупреждения лесных пожаров [3] или в исследованиях, направленных на задачи оборонной промышленности [1].

Основу симулятора гиперспектральных данных составляет моделирование физических взаимодействий, в том числе, электромагнитного излучения. В общем

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90079.

случае, моделирование распространения электромагнитного излучения в пространстве представляет собой случай решения задачи проверки пересечения двух объектов. Один из способов решения данной задачи заключается в применении трассировки лучей, реализованного в разработанном программном комплексе [4].

Первым шагом в трассировке лучей является их формирование на модельной сцене. В программном комплексе лучи испускаются на сцену из точки наблюдения в направлениях, задающихся с применением псевдослучайного генератора чисел. При распространении по виртуальному пространству из ансамбля тел, каждый из испущенных лучей может претерпевать различные изменения свойств. Взаимодействие луча со сценой, например, столкновение с телом, прохождение через тело или отсутствие взаимодействия луча со сценой по заданным критериям, приводит к вызову одной из предварительно подготовленных процедур. Поскольку в данном трассировщике лучей используется алгоритм трассировки пути, то направления распространения лучей по сцене обладают стохастикой, поэтому каждый луч претерпевает собственное, уникальное число и виды взаимодействий, которые нельзя предположить заранее и заложить в основу математической модели. Результат взаимодействий определяется в обратном порядке – от последнего взаимодействия к источнику, откуда луч вышел, таким образом формируя сигнал на точке наблюдения.

В ранних работах [4, 5] были представлены результаты применения алгоритма трассировки лучей для отрисовки сцены в видимом спектре. Расчет видимой области спектра в программном комплексе имеет исключительно демонстрационный характер и не предназначен для получения каких-либо количественных радиометрических величин. Моделирование ИК спектра качественно изменяет вид получаемой информации, поскольку мы начинаем исследовать сигнал, источником которого являются наблюдаемые тела. Каждое твердое тело, жидкость или газ с температурой выше абсолютного нуля является источником теплового сигнала, который формирует один из важнейших компонентов фоновой засветки – механизм излучательного теплопереноса.

Цель данной работы – разработка алгоритма расчета механизма излучательного теплопереноса в программном комплексе моделирования ИК сцен. В работе предложен алгоритм трассировки пути, учитывающий вклад ближайших тел в излучение наблюдаемой площадки. На основе заранее подготовленных модельных сцен был проведен качественный анализ результатов расчета с учетом разработанного алгоритма.

1. Алгоритм расчета излучательного теплопереноса

Одной из отличительных особенностей программного комплекса является аппаратное ускорение расчетов на основе графических процессоров (ГП). Инструкции для исполнения на ГП являются результатом компиляции написанных на специальных языках программ, называемых *шейдерами*. Унифицированная архитектура современных ГП позволяет в шейдерах выполнять произвольные математические расчеты, не привязанные к решению задач визуализации.

В настоящее время к набору высокоскоростных ядер ГП общего назначения добавляются вычислительные блоки, обеспечивающие аппаратное ускорение задачи *трассировки лучей*. Самой важной их особенностью является возможность рекурсивного вызова процедур из шейдеров и аппаратное ускорение ряда алгоритмов, в том числе процедуры поиска точки пересечения луча с телом на сцене.

Реализованный алгоритм отрисовки сцены методом трассировки пути в ИК спектре начинается с *шейдера формирования лучей*. *Шейдер формирования лучей* вызывается для каждого пикселя фокальной плоскости моделируемого фотопри-

емного устройства (ФПУ), на которую будет падать итоговое излучение от тел на сцене. Для этого из точки наблюдения на сцену через сетку фрагментов фокальной плоскости отправляется набор лучей, причем каждый луч проходит не через центр фрагмента, а с небольшим псевдослучайным колебанием относительно него. Подобный подход позволяет избавиться от проблемы алиасинга изображения и сформировать более естественные переходы на гранях резко отличающихся по своим свойствам объектов сцены.

Исходящие из точки наблюдения лучи распространяются по сцене в соответствии с заданным полем зрения оптической системы и могут претерпевать различные виды взаимодействий с телами. Моделирование взаимодействия лучей с телами выполняется *шейдером ближайшего столкновения*.

В ИК области спектра сначала необходимо определить телесный угол Ω_{OS} , в котором элемент фокальной плоскости ФПУ получает поток фотонов с наблюдаемой поверхности S_{OS} в заданном интервале длин волн. Для этого из известного поля зрения оптической системы FOV_{optics} в приближении излучения в прямом круговом конусе мы получаем телесный угол, в котором излучает наблюдаемая площадь поверхности тела:

$$\Omega_{OS} = 2\pi(1 - \cos(FOV_{optics} / 2)). \quad (1)$$

Полученные величины помещаются во временное хранилище для последующих вычислений. Результатом расчета *первого взаимодействия* сформированного луча со сценой является число фотонов, излучаемых с единицы площади в секунду в данном телесном угле в данном интервале длин волн с учетом отклонения наблюдаемой площадки от направления распространения луча из элемента сенсора на угол θ_{OS} :

$$N_{phd0} = \Omega_{OS} \cdot \cos(\theta_{OS}) \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L_B(\lambda) d\lambda, \quad \frac{\text{фотонов}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}, \quad (2)$$

где L_B – спектральная плотность энергетической яркости по Планку. Интенсивность в виде числа фотонов, достигших элемент сенсора, можно получить путем произведения N_{phd0} на площадь элемента S_d .

Второе взаимодействие моделируемого луча с телами на сцене вызывает алгоритм расчета вклада окружения N_{phi} в излучение площади поверхности, определенной на первом взаимодействии:

$$N_{phd} = N_{phd0} + \sum_1^N N_{phi}. \quad (3)$$

Для учета излучения окружающих тел на наблюдаемой площадке S_{OS} строится единичная полусфера с центром в точке пересечения первого луча, на поверхности которой задано равномерно распределенное облако точек. Число точек определяет максимальное число учтенных источников излучения и минимальный размер элемента телесного угла Ω_{prim} , в котором сигнал дополнительного источника вносит вклад.

Каждый луч, проходящий из центра полусферы через точку на ее поверхности, может совершить столкновение с различными излучающими площадками. Чтобы определить, какая часть излучения внешнего источника формирует отражатель-

ную добавку к сигналу площади S_{OS} , нам необходимо рассчитать угловой коэффициент K_f с учетом двулучевой функции отражательной способности Ламбертовской поверхности, телесного угла θ_{prim} и угла между нормалью к площадке источника излучения и направлением распространения луча θ_{prim} :

$$K_f = \frac{\Omega_{prim} \cdot \cos(\theta_{prim})}{\pi \cdot \Omega_{OS} \cdot \cos(\theta_{OS})}, \cos(\theta_{OS}) > 0. \quad (4)$$

С учетом K_f мы можем определить ту часть излученных этим примитивом фотонов, которые формируют отражательную добавку к результату расчета первого взаимодействия:

$$N_{phi} = K_f \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L_B(\lambda)(1 - \varepsilon(\lambda)) d\lambda, \quad (5)$$

где ε – коэффициент серости материала площадки S_{OS} . Таким образом, мы можем определять вклад в сигнал наблюдаемой площадки путем многократной выборки источников излучения по направлениям, которые определены однородным распределением в полусфере.

Если луч, испущенный из точки наблюдения на сцену, не выполнил какого-либо взаимодействия со сценой, то будет вызвана процедура *шейдера промаха*. В данном варианте реализации программного симулятора, шейдер промаха вернет нулевое число излученных фотонов и завершит трассировку лучей.

2. Результаты расчета ИК сцен с применением трассировки пути

Для исследования разработанного трассировщика ИК лучей была поставлена серия модельных экспериментов на компьютере под управлением ОС Debian 11, с процессором Intel Core i9 12900K и ГП Nvidia RTX 3080 12G. Апробация ИК трассировщика пути была проведена на основе двух сцен: модель корнеллской коробки и модель человека на фоне кирпичной стены [4, 5].

Модель корнеллской коробки представляет собой классическую сцену для оценки качества трассировщиков лучей в видимой области спектра. Она состоит из прямоугольного помещения, в котором для каждой грани поставлены в соответствии в различающиеся по свойствам материалы. На верхней грани размещается источник освещения, на полу располагается несколько тел произвольной формы.

Для каждого тела задан диффузный материал, обладающей определенной отражательной способностью в видимом спектре, которая определяет его цвет, и характеристиками коэффициента серости и температуры в ИК области. Сцена в видимой области спектра без моделирования теней и остальных элементов представлена на рис. 1, а. На этом изображении ИК характеристики различающихся материалов обозначены в виде подписей, где верхнее значение соответствует коэффициенту серости в ИК области спектра, а нижнее – температуре материала тела.

Добавление трассировки лучей в видимом спектре (рис. 1, б) формирует карту теней от единственного источника освещения, поэтому вблизи ярко раскрашенных объектов или между телами можно наблюдать формирование затемненных областей.

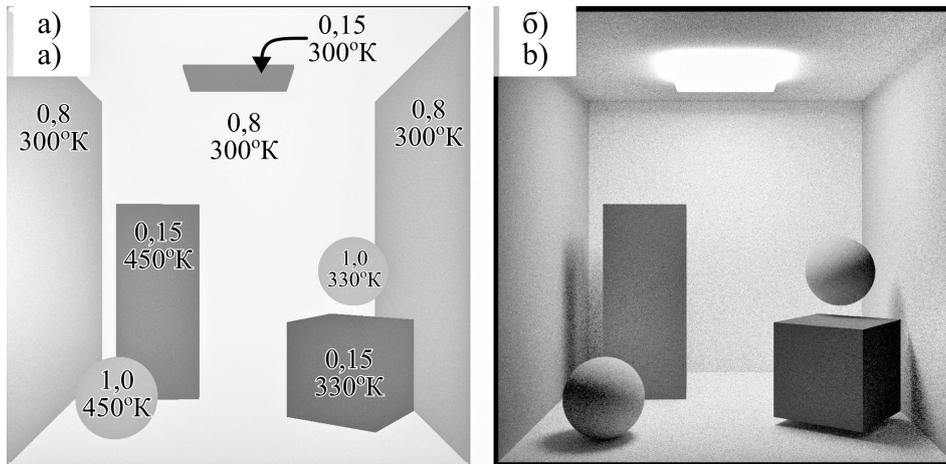


Рис. 1 – Изображение сцены корнеллской коробки без учета (а) и с учетом трассировки лучей (б). ИК характеристики материалов помечены подписью, где в верхней строке указан коэффициент серости, а в нижней – температура в градусах Кельвина

Fig. 1 – A Cornell box scene image without (a) and using raytracing (b). The IR materials characteristics are marked up with a signature, where top line is a greyiness value and bottom line is a temperature in Kelvin degrees

Вид данной сцены в ИК спектре без трассировки лучей (рис. 2, а) позволяет определить наиболее яркие участки благодаря сильным температурным различиям. Включение трассировки пути обеспечивает учет излучательного теплопереноса по сцене (рис. 2, б), что формирует области локального нагрева вокруг горячих тел и участки тени, куда излучение не попадает. Подобное решение ухудшает контрастность теплового изображения и делает грани объектов более размытыми.

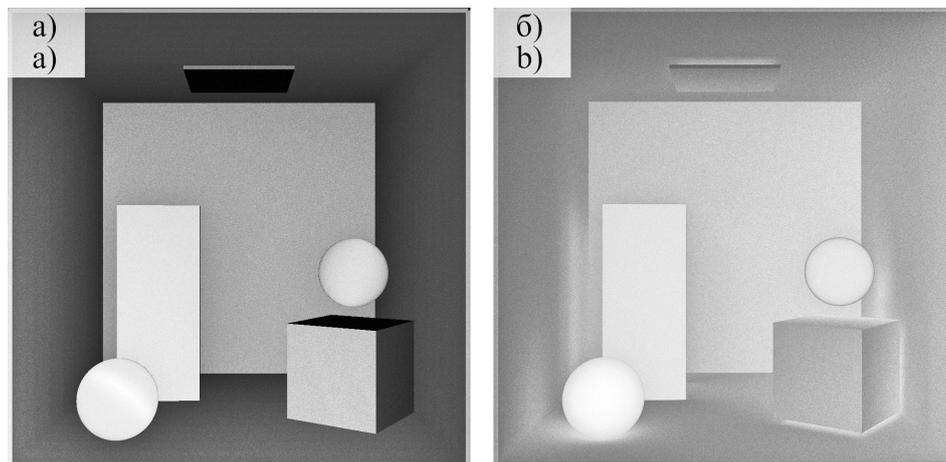


Рис. 2 – Изображение сцены корнеллской коробки в ИК диапазоне от 3 до 5 мкм без (а) и с моделированием распространения излучения (б)

Fig. 2 – A Cornell box scene image in the IR from 3 to 5 μm without (a) and with (b) radiation propagation modeling

На второй модельной сцене (рис. 3) представлена трехмерная модель человека на фоне кирпичной стены с воссозданным температурным профилем на основе эмпирических данных [4].

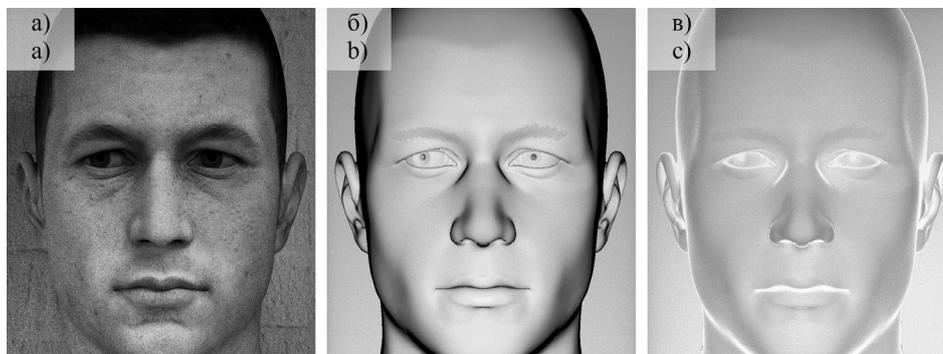


Рис. 3 – Изображение сцены с моделью человека в видимом спектре (а), в ИК спектре без учета излучательного теплопереноса (б) и с учетом (в)

Fig. 3 – A human model scene in visible spectrum (a), IR spectrum without (b) and with radiative heat transfer (c)

Учет излучательного теплопереноса сформировал ряд новых особенностей изображения. Например, область лица вблизи глаз, губ и ушей стали более яркими, а температурный градиент к краю лица с данного ракурса стал менее резким.

Заключение

В данной работе представлены разработки механизма трассировки лучей методом трассировки пути для моделирования трехмерных ИК сцен в разработанном программном комплексе. Предложенный алгоритм излучательного теплопереноса позволяет учесть вклад множества источников излучения на сцене в итоговый сигнал, формирующий отклик на материале фотоприемного устройства. Применение трассировки лучей методом трассировки пути для моделирования распространения электромагнитных волн позволило учесть механизм излучательного теплопереноса в ИК области спектра что качественно улучшило картины сцены. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ 20-37-90079.

ЛИТЕРАТУРА

1. An end-to-end hyperspectral scene simulator with alternate adjacency effect models and its comparison with CameoSim / U.A. Zahidi, P.W.T. Yuen, J. Piper, P.S. Godfree // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12 (1). – P. 74. – DOI: 10.3390/rs12010074.
2. Чешкова А.Ф. Обзор современных методов обнаружения и идентификации болезней растений на основе анализа гиперспектральных изображений // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 202–213. – DOI: 10.18699/VJGB-22-25.
3. Скуднева О.В., Коптев С.В., Иванцов С.В. Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров // *Известия вузов. Лесной журнал*. – 2020. – № 6. – С. 194–203. – DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-194-203.
4. Зверев А.В., Ипатов Д.Е. Моделирование взаимодействия излучения со средой в программном комплексе симуляции трехмерных динамических сцен // *Успехи прикладной физики*. – 2023. – Т. 11, № 5. – С. 433–445. – DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-433-445.

5. Зверев А.В., Ипатов Д.Е. Модель динамической ИК сцены с асинхронной регистрацией излучения // *Наноиндустрия*. – 2023. – Т. 16, № S9-1 (119). – С. 234–242. – DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.234.242.
6. Zverev A.V., Ipatov D.E. Complexities in data stream generation of model 3D scenes for IR time differentiating sensors // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2022. – P. 15–19. – DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855059.

FEATURES OF RADIOMETRIC QUANTITIES SYNTHETIC IMAGES FORMATION IN THE IR REGION OF THE SPECTRUM

Zverev A.V., Ipatov D.E.
Motiv NT LLC, Moscow, Russia

Physically correct synthetic images of 3D scenes in a given wavelength range are of great importance in solving some applied problems. Such data generation is based on a physical interactions modelling, including electromagnetic radiation propagation in a scene space. This paper presents the results of a ray tracing mechanism development in a 3D scene modeling software package. An algorithm for calculation radiative heat transfer that allows accounting a radiation from multiple bodies in the scene is proposed. In order to be executed on graphical processors it is implemented in form of shader programs. Each emitted ray, which simulates the propagation of an electromagnetic wave, undergoes no more than two interactions with bodies and makes an addition to an observed area radiation in a number of photons given wavelengths range and solid angle. To evaluate the algorithm a number of model scenes were proposed, on which comparative study was carried out in case of infrared region modeling. As results show, taking into account the mechanisms of radiative heat transfer allow for qualitative improvement of the resulting images and makes a significant contribution to the background signal.

Keywords: radiative heat transfer, modeling, graphical processing unit, infrared, ray tracing

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-7-14

REFERENCES

1. Zahidi U.A., Yuen P.W.T., Piper J., Godfree P.S. An end-to-end hyperspectral scene simulator with alternate adjacency effect models and its comparison with CameoSim. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12 (1), p. 74. DOI: 10.3390/rs12010074.
2. Cheshkova A.F. Obzor sovremennykh metodov obnaruzheniya i identifikatsii boleznei rastenii na osnove analiza giperspektral'nykh izobrazhenii [A review of hyperspectral image analysis techniques for plant disease detection and identification]. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 202–213. DOI: 10.18699/VJGB-22-25.
3. Skudneva O.V., Koptev S.V., Ivantsov S.V. Navigatsionno-pilotazhnaya sistema bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya monitoringa lesnykh pozharov [Navigation and piloting system of unmanned aerial vehicle for forest fires monitoring]. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal = Bulletin of higher educational institutions. Forestry journal*, 2020, no. 6, pp. 194–203. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-194-203.
4. Zverev A.V., Ipatov D.E. Modelirovanie vzaimodeistviya izlucheniya so sredoi v programnom komplekse simulyatsii trekhmernykh dinamicheskikh stsen [An environmental radiation interaction modeling in dynamic scene simulation software]. *Uspekhi prikladnoi fiziki = Advances in Applied Physics*, 2023, vol. 11, no. 5, pp. 433–445. DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-433-445.
5. Zverev A.V., Ipatov D.E. Model' dinamicheskoi IK stseny s asinkhronnoi registratsiei izlucheniya [Model of a dynamic IR scene with asynchronous radiation registration]. *Nanoindustrialiya = Nanoindustry*, 2023, vol. 16, no. S9-1 (119), pp. 234–242. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.234.242.
6. Zverev A.V., Ipatov D.E. Complexities in data stream generation of model 3D scenes for IR time differentiating sensors // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). IEEE, 2022, pp. 15–19. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855059.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Зверев Алексей Викторович – родился в 1975 году, канд. физ.-мат. наук, звания нет, Руководитель отдела СБИС-разработки, ООО «Мотив НТ». Область научных интересов: разработка интегральных схем для сбора и анализа данных. Опубликовано 110 научных работ. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Большевицкая, 35. E-mail: zverev@motivnt.ru).

Zverev Alexey Victorovich – (b. 1975), Candidate of Science (Phys.&Math.), Lead of VLSI-development department, Motiv NT. Research Interests: VLSI-development for signal processing. He is author of 110 scientific papers. (Address: 630102, Russian Federation, Novosibirsk, Bolshevistskaya, 35. E-mail: zverev@motivnt.ru).



Ипатов Дмитрий Евгеньевич – родился в 1995 году, завершил обучение в аспирантуре Института физики полупроводников им А.В. Ржанова (ИФП СО РАН) в 2022 году, в настоящее время работает в ООО «Мотив НТ» на должности ведущего инженера-электроника СБИС. Область научных интересов: схемотехника, разработка визуализаторов трехмерных сцен. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630102, Россия, Новосибирск, Большевицкая, 35. E-mail: dipatov@motivnt.ru).

Ipatov Dmitriy Evgen'evich (b. 1995) – completed his postgraduate studies at the A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics (ISP SB RAS) in 2022, currently works at Motiv NT LLC as a leading VLSI electronics engineer. His research interests are currently focused on circuit design, development of 3D scene visualizers. He is author of 7 scientific papers. (Address: 630102, Russian Federation, Novosibirsk, Bolshevistskaya, 35. E-mail: dipatov@motivnt.ru).

Статья поступила 29 октября 2024 г.
Received October 29, 2024

To Reference:

Zverev A.V., Ipatov D.E. Osobennosti formirovaniya sinteticheskikh izobrazhenii radiometricheskikh velichin v IR oblasti spektra [Features of radiometric quantities synthetic images formation in the IR region of the spectrum]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 7–14. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-7-14.

УДК 621.396.96

**ОШИБКА УСТАНОВКИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА, ЗАМЕЩАЕМОГО
ДВУХТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛЬЮ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНТЕННЫ
С РАЗНОСТНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ**

А.В. Киселев, А.В. Таюров

Новосибирский государственный технический университет

Рассмотрены вопросы оценки систематических ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения радиолокационного объекта, имитируемого двухточечной моделью, при использовании антенн с разностными диаграммами направленности. Установлена зависимость угловой ошибки от параметров модели, таких как разность излучателей, ожидаемое положение кажущегося центра излучения и коэффициенты аппроксимации диаграммы направленности антенны. Угловая ошибка пеленга определена путем ее включения в пеленгационную характеристику антенны в качестве поправки к угловому положению. Расчеты выполнены для суммарной и разностной диаграмм направленности, на основе которых проведено сравнение величин ошибок. Определено соотношение коэффициентов аппроксимации для суммарной и разностной диаграмм направленности антенны. Полученные аналитические выражения могут быть использованы при решении прикладных задач, связанных с разработкой матричных имитаторов и прогнозированием точностных характеристик имитационных комплексов.

Ключевые слова: матричный имитатор, ошибка установки углового положения, кажущийся центр излучения, имитационное моделирование, разностная диаграмма направленности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-15-25

Введение

Ранее, в [1], было показано, что замещение радиолокационного объекта двухточечной моделью, используемое при построении матричных имитаторов (далее сокращенно МИ) [2–4], приводит к специфическим ошибкам измерения радиотехнической системой (РТС) его угловых координат.

Полученные в [1] результаты определяют связь этих ошибок с угловыми размерами матрицы, шириной диаграммы направленности (ДН) антенны и коэффициентами аппроксимации ее ДН. Они получены для измерения угловых координат кажущегося центра излучения (КЦИ) [5] сканирующей игольчатой ДН антенны.

Цель настоящей работы – развить результаты, полученные для игольчатой ДН, применительно к разностным диаграммам направленности.

Основные моменты исследования, представленного в [1], заключаются в следующем.

Рассматривается МИ, моделируемый двухточечной моделью (рис. 1).

Предполагается, что такая модель состоит из двух излучающих точек, разнесенных по угловой координате на нормированное к ширине ДН ($2\alpha_{0,5}$) РТС расстояние 2δ . Тогда, как показано в [1], ошибка установки углового положения

КЦИ объекта, нормированная к излучателю МИ, равная разности между измеренным положением КЦИ ($\xi_{\text{изм}}$) и ожидаемым (ξ), составит:

$$\chi(\xi) = -\operatorname{Re} \left[\sqrt[3]{\sqrt{P^3 - 3\xi^2 P^2 + 3\xi^4 P + \xi^4} + (\xi^3 - \xi)(1 + j\sqrt{3})} \right], \quad (1)$$

где

$$P = \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{6r_4},$$

r_2, r_4 – коэффициенты аппроксимации ДН; j – мнимая единица.

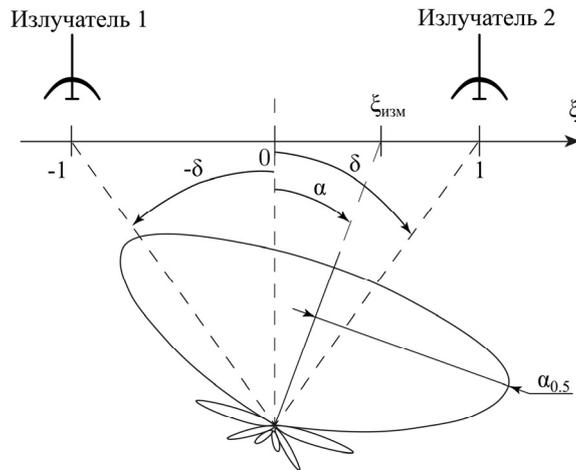


Рис. 1 – Двухточечная модель

Fig. 1 – Two-point model

1. Постановка задачи

При выводе формулы (1) угловое положение КЦИ принималось равным значению угла поворота сканирующей антенны, имеющей игольчатую ДН, при которой амплитуда сигнала на ее выходе принимает максимальное значение [6, 7].

Для этого определялась и приравнивалась к нулю производная от зависимости этой амплитуды от угла поворота оси ДН.

Для того чтобы получить результат для разностной ДН, воспользуемся несколько иным подходом. Его суть заключается во введении в выражение пеленгационной характеристики величины угловой ошибки определения положения КЦИ $\Delta\alpha$ с последующим ее нахождением. То есть будем считать, что при наведении оси антенны на КЦИ $\alpha_0 = \alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ – угловая величина ошибки определения положения.

2. Решение

Рассмотрим сначала случай суммарной ДН.

При использовании полиномиальной аппроксимации ДН $F(\alpha)$ получим следующее.

При направлении оси ДН на КЦИ имеем:

$$\left. \frac{dU_{\Sigma}(\alpha_0, \xi, \delta)}{d\alpha_0} \right|_{\alpha_0=\alpha_{\text{ц}}+\Delta\alpha} = 2r_2 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta) \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta) \dot{S}_2 \right] + 4r_4 \cdot \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0, \quad (2)$$

где амплитуды сигналов излучателей:

$$\dot{S}_1 = (1 - \xi) / 2 = (1 - \alpha_{\text{ц}} / \delta) / 2, \quad \dot{S}_2 = 1 - \dot{S}_1 = (1 + \alpha_{\text{ц}} / \delta) / 2. \quad (3)$$

Величины угловых положений излучателей и угловых положений КЦИ (при имитации в пределах матрицы) малы, поэтому в слагаемых с низкой степенью они могут быть опущены:

$$\begin{aligned} & 2r_2 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta) \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta) \dot{S}_2 \right] + \\ & + 4r_4 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0. \\ & 2r_2 \left[\Delta\alpha \dot{S}_1 + \Delta\alpha \dot{S}_2 \right] + 4r_4 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0. \\ & 2r_2 \Delta\alpha (\dot{S}_1 + \dot{S}_2) + 4r_4 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0. \end{aligned}$$

Разделим выражение на $4r_4$:

$$\frac{r_2}{2r_4} \Delta\alpha (\dot{S}_1 + \dot{S}_2) + \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

Сумма амплитуд сигналов излучателей равна единице: $\dot{S}_1 + \dot{S}_2 = 1$, тогда

$$\frac{r_2}{2r_4} \Delta\alpha + \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

Сгруппируем:

$$\frac{r_2}{2r_4} \Delta\alpha + \left[((\alpha_{\text{ц}} + \delta) + \Delta\alpha)^3 \dot{S}_1 + ((\alpha_{\text{ц}} - \delta) + \Delta\alpha)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

Раскроем скобки с учетом того, что величина ошибки много меньше других угловых величин ($\Delta\alpha \ll \alpha_{\text{ц}}, \delta$):

$$\begin{aligned} ((\alpha_{\text{ц}} \pm \delta) + \Delta\alpha)^3 &= (\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^2 \Delta\alpha + 3(\alpha_{\text{ц}} \pm \delta) \Delta\alpha^2 + \Delta\alpha^3 \approx \\ &\approx (\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^2 \Delta\alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив амплитуды сигналов излучателей матрицы (3) и выразив величину ошибки пеленга, получим

$$\Delta\alpha(\alpha_{\text{ц}}, r_2 / r_4, \delta) = -\frac{4\alpha_{\text{ц}}(\delta - \alpha_{\text{ц}})(\delta + \alpha_{\text{ц}})}{6\delta^2 - 6\alpha_{\text{ц}}^2 + r_2 / r_4} = -\frac{4\delta^2\alpha_{\text{ц}} + 4\alpha_{\text{ц}}^3}{6\delta^2 - 6\alpha_{\text{ц}}^2 + r_2 / r_4}.$$

Выполним замену $\alpha_{\text{ц}} = \xi\delta$:

$$\Delta\alpha(\xi, r_2 / r_4, \delta) = \frac{4(\xi^3 - \xi)\delta^3}{6(-\xi^2 + 1)\delta^2 + r_2 / r_4}.$$

Нормированная к угловому размеру базы матрицы величина ошибки пеленга КЦИ:

$$\chi(\xi, r_2 / r_4, \delta) = \frac{\Delta\alpha}{\delta} = \frac{4(\xi^3 - \xi)\delta^3}{6(-\xi^2 + 1)\delta^2 + r_2 / r_4} \frac{1}{\delta} = \frac{4(\xi^3 - \xi)\delta^2}{6(-\xi^2 + 1)\delta^2 + r_2 / r_4}.$$

Разделим числитель и знаменатель на δ^2 :

$$\chi(\xi, r_2 / r_4, \delta) = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{2r_4}}. \quad (5)$$

Ошибки для разностной ДН.

При направлении оси ДН на КЦИ амплитуда сигнала на выходе приемной антенны обращается в нуль [8]:

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim F_{\Delta}(\alpha_0 + \delta)\dot{S}_1(\xi) + F_{\Delta}(\alpha_0 - \delta)\dot{S}_2(\xi) = 0, \quad (6)$$

где ДН аппроксимируется полиномом третьей степени:

$$F_{\Delta}(\alpha) = g_1\alpha + g_3\alpha^3,$$

g_1, g_3 – коэффициенты аппроксимации ДН.

Вводя в (6) параметр угловой ошибки $\alpha_0 = \alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha$, получим

$$\begin{aligned} & g_1 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)\dot{S}_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)\dot{S}_2(\xi) \right] + \\ & + g_3 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2(\xi) \right] = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Проведем ряд упрощений.

$$\begin{aligned} & g_1 \left[\Delta\alpha (\dot{S}_1(\xi) + \dot{S}_2(\xi)) \right] + \\ & + g_3 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2(\xi) \right] = 0. \end{aligned}$$

$$g_1 \Delta\alpha + g_3 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 S_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 S_2(\xi) \right] = 0.$$

$$\frac{g_1}{g_3} \Delta\alpha + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 S_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 S_2(\xi) = 0.$$

$$\frac{g_1}{g_3} \Delta\alpha + ((\alpha_{\text{ц}} + \delta) + \Delta\alpha)^3 S_1(\xi) + ((\alpha_{\text{ц}} - \delta) + \Delta\alpha)^3 S_2(\xi) = 0.$$

Раскроем скобки, основываясь на (4):

$$\begin{aligned} \frac{g_1}{g_3} \Delta\alpha + \left((\alpha_{\text{ц}} + \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} + \delta)^2 \Delta\alpha \right) S_1(\xi) + \\ + \left((\alpha_{\text{ц}} - \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} - \delta)^2 \Delta\alpha \right) S_2(\xi) = 0. \end{aligned}$$

Подставив амплитуды сигналов излучателей матрицы (3) и выразив величину ошибки пеленга, получим

$$\Delta\alpha = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^3}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + g_1 / g_3}.$$

Нормированная к угловому размеру базы матрицы величина ошибки пеленга КЦИ:

$$\chi(\xi, g_1 / g_3, \delta) = \frac{\Delta\alpha}{\delta} = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^2}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + g_1 / g_3} = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{g_1}{g_3}}.$$

Сравним (2) и (7).

Оба соотношения являются пеленгационной характеристикой, но получены различными способами: первое – по суммарной ДН, второе – по разностной.

Установим соответствие коэффициентов аппроксимации:

$2r_2 = g_1$; $4r_4 = g_3$, либо

$$\frac{r_2}{2r_4} = \frac{g_1}{g_3}.$$

При этом $r_0 \neq g_0$; $r_1 \neq g_1$; $r_2 \neq g_2$; $r_3 \neq g_3$; $r_4 \neq g_4$.

Это позволяет установить следующее. Выражение (1), ранее использованное для вычисления ошибки пеленгации по суммарной диаграмме направленности, может быть адаптировано для разностной диаграммы направленности. Для этого необходимо лишь заменить коэффициенты аппроксимации диаграммы направленности, основываясь на полученных соответствиях.

Ошибки для разностной ДН, которая получена из двух суммарных.

Рассмотрим часто используемый на практике [9–11] случай формирования разностной ДН как разности двух взаимно отклоненных суммарных ДН.

В этом случае зависимость амплитуды сигнала разностного канала от углового положения оси ДН имеет вид

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim [F(\alpha_0 - \varepsilon + \delta) - F(\alpha_0 + \varepsilon + \delta)] \dot{S}_1(\xi) + \\ + [F(\alpha_0 - \varepsilon - \delta) - F(\alpha_0 + \varepsilon - \delta)] \dot{S}_2(\xi),$$

где ε – угол отклонения оси суммарной ДН от равносигнального направления.

Тогда:

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta) \dot{S}_1(\xi) + F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon - \delta) \dot{S}_2(\xi) - \\ - F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon + \delta) \dot{S}_1(\xi) - F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon - \delta) \dot{S}_2(\xi).$$

При использовании аппроксимации ДН полиномом четвертой степени нормированная амплитуда сигнала на входе приемной антенны равна

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^4] \dot{S}_1 + \\ + [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon - \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon - \delta)^4] \dot{S}_2 - \\ - [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon + \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon + \delta)^4] \dot{S}_1 - \\ - [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon - \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon - \delta)^4] \dot{S}_2 = 0.$$

Упростим с учетом того, что $\Delta\alpha \ll \alpha_{\text{ц}}$, δ :

$$(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^2 = ((\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta) + \Delta\alpha)^2 \approx (\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta)^2 + 2\Delta\alpha(\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta),$$

$$(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^4 = ((\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta) + \Delta\alpha)^4 \approx (\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta)^4 + 4(\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta)^3 \Delta\alpha.$$

Подставив амплитуды сигналов излучателей (3) и угловое положение КЦИ ($\alpha_{\text{ц}} = \xi\delta$), получим

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) = 4\varepsilon \left[\left((-6\xi^2 + 6)\delta^2 + 2\varepsilon^2 \right) \Delta\alpha + \right. \\ \left. + (-4\xi^3 + 4\xi)\delta^3 \right] r_4 + r_2 \Delta\alpha = 0. \quad (8)$$

Разностная ДН образуется из суммарной (четной функции), поэтому в выражении (8) присутствуют только четные коэффициенты аппроксимации.

Выразим угловую величину ошибки пеленга КЦИ:

$$\Delta\alpha = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^3}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + \varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4}}.$$

Нормированная к угловому размеру базы матрицы величина ошибки пеленга КЦИ:

$$\begin{aligned} \chi(\xi, r_2 / r_4, \delta, \varepsilon) &= \frac{\Delta\alpha}{\delta} = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^2}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + \varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4}} = \\ &= \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \left(\varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4} \right)}. \end{aligned}$$

3. Анализ соотношений

Сведем в таблицу полученные соотношения для нахождения ошибки пеленга в пределах матрицы.

Выражения для определения систематической ошибки пеленга КЦИ

Expressions for determining the systematic error of the KCI bearing

| Вид ДН | Аппроксимирующий полином $F(\alpha)$ | Нормированная к разному излучателей величина ошибки |
|--|--------------------------------------|--|
| Суммарная | $r_0 + r_2\alpha^2 + r_4\alpha^4$ | $\chi_1 = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{2r_4}}$ |
| Разностная | $g_1\alpha + g_3\alpha^3$ | $\chi_2 = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{g_1}{g_3}}$ |
| Разностная по аппроксимированной суммарной | $r_0 + r_2\alpha^2 + r_4\alpha^4$ | $\chi_3 = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \left(\varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4} \right)}$ |

На рис. 2 показаны результаты расчета ошибок по выражениям из таблицы. Помимо этого, сплошной линией обозначены результаты численного эксперимента χ_0 , полученные по суммарной ДН без аппроксимации. В качестве модели ДН использована экспонента Гаусса. Направление на КЦИ определялось по максимуму сигнала при сканировании пространства ДН антенны. Ошибка пеленга вычислялась как разность между ожидаемым и измеренным положениями КЦИ. Кривая введена в качестве референтной.

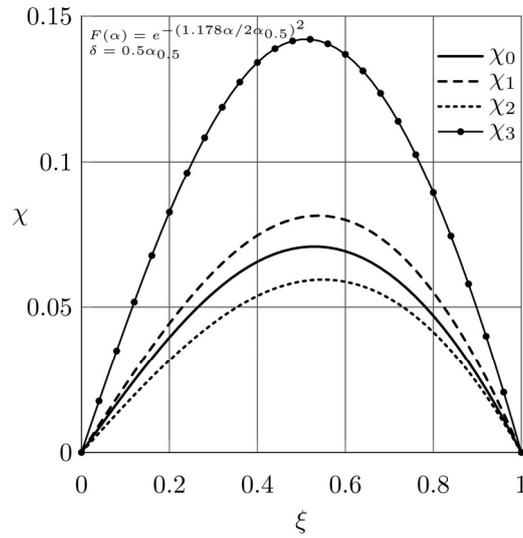


Рис. 2 – Зависимость ошибки пеленга от углового положения КЦИ

Fig. 2 – The dependence of the bearing error on the angular position of the apparent radiation center

Максимальное отклонение от χ_0 наблюдается у функции χ_3 , что можно объяснить следующим образом: область пересечения разностной ДН нуля образуется путем вычитания «скатов» суммарных ДН. Поскольку суммарная ДН аппроксимируется в области максимума, качество аппроксимации на «скате» снижено. В результате этого в области нуля будут наблюдаться искажения разностной ДН.

Применение суммарной ДН, аппроксимированной полиномом четвертой степени, всегда дает завышенную ошибку: $\chi_1 > \chi_0$. Это является положительным аспектом, поскольку оценка ошибки в таком случае будет пессимистичной, обеспечивая гарантию ее непревышения.

Наименьшая ошибка пеленга (χ_2) получена при использовании разностной ДН, которая аппроксимирована полиномом третьей степени. Таким образом, наиболее точным методом пеленгации является метод, основанный на разностной диаграмме направленности, что согласуется с утверждениями, приведенными в литературе [11].

Заключение

1. Предложено включать угловую ошибку в пеленгационную характеристику антенны в виде поправки к угловому положению. В результате получена зависимость угловой ошибки от параметров системы, таких как разнос излучателей модели, ожидаемое положение кажущегося центра излучения и коэффициенты аппроксимации диаграммы направленности антенны.

2. Угловое положение кажущегося центра излучения, создаваемого двумя или более излучающими точками, может быть определено с применением как суммарной, так и разностной диаграмм направленности антенны. При этом результаты пеленга будут различаться, и величина этих различий будет зависеть от метода

описания диаграмм направленности. Рассмотрены различные подходы: в одном варианте разностная ДН аппроксимирована непосредственно, а в другом – составлена на основе двух аппроксимированных суммарных ДН, разнесенных на заданный угол.

3. Коэффициенты аппроксимации суммарной ДН связаны с аналогичными коэффициентами аппроксимации разностной ДН, что позволяет учитывать их взаимосвязь при вычислениях и использовать единые формулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Киселев А.В., Таюров А.В.** Систематические ошибки установки углового положения в матричных имитаторах радиоэлектронной обстановки // Доклады АН ВШ РФ. – 2023. – № 4 (61). – С. 34–44. – DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44.
2. **Ergezer H., Keskin M.F., Gunay O.** Hardware-in-the-loop radar test simulator // 2014 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH). – IEEE, 2014. – Vol. 1. – P. 666–673. – DOI: 10.5220/0005034506660673.
3. **Huang H., Pan M., Lu Z.** Hardware-in-the-loop simulation technology of wide-band radar targets based on scattering center model // Chinese Journal of Aeronautics. – 2015. – Vol. 28 (5). – P. 1476–1484.
4. **Wayne D., McBride S., McKenna J.** Multiple target, dynamic RF scene generator // AMTA 2016 Proceedings. – Austin, TX, 2016. – P. 319–324.
5. **Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Коновалюк М.А.** Определение параметров многоточечных целей по спектру радиолокационного изображения // Вестник МАИ. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 193–198.
6. **Loginov A.A., Semenova M.Yu.** Applying correlation method to the problem of passive amplitude monopulse direction finding // IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks. – IEEE, 2011. – P. 66–68. – DOI: 10.1109/ICCSN.2011.6014850.
7. Comparative analysis of adjacent and maximum / Y. Guo, B. Li, W. Cui, H. Wu // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2020. – DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386490.
8. Generalized monopulse method with coherent integration in mechanical scanning radar / W. Zhou, G. Li, J. Xie, Y. Du // CIE International Conference on Radar (RADAR). – IEEE, 2016. – DOI: 10.1109/RADAR.2016.8059571.
9. **Mitrović N.M., Ponjavić M.M.** Multichannel 2-D direction finding based on differential amplitude detection // IEEE Sensors Journal. – 2015. – Vol. 15 (9). – P. 5064–5070. – DOI: 10.1109/jsen.2015.2434876.
10. Справочник по радиолокации. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
11. **Леонов А.И., Фомичев К.И.** Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.

ERROR IN SETTING THE ANGULAR POSITION OF A RADAR OBJECT REPLACED BY A TWO-POINT MODEL WHEN USING AN ANTENNA WITH A DIFFERENCE RADIATION PATTERN

Kiselev A.V., Tayurov A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The issues of estimating systematic errors in setting the angular position of the apparent radiation center of a radar object simulated by a two-point model when using antennas with difference radiation patterns are considered. The dependence of the angular error on the model parameters,

such as the spacing of the emitters, the expected position of the apparent center of radiation and the coefficients of the antenna radiation pattern approximation, is established. The angular error of the bearing is determined by including it in the direction finding characteristic of the antenna as a correction to the angular position with further analytical expression. Calculations were performed for the sum and difference directional diagrams, on the basis of which the error values were compared. The ratio of the approximation coefficients for the sum and difference radiation patterns of the antenna is determined. The obtained analytical results can be used in solving applied problems related to the development of matrix simulators and forecasting the accuracy characteristics of simulation complexes.

Keywords: matrix simulator, error in setting the angular position, apparent center of radiation, simulation, antenna difference pattern.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-15-25

REFERENCES

1. Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sistematische oshibki ustanovki uglovogo polozheniya v matrichnykh imitatorakh radioelektronnoi obstanovki [Systematic errors in setting the angular position in matrix simulators of the radio-electronic environment]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 34–44. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44.
2. Ergezer H., Keskin M.F., Gunay O. Hardware-in-the-loop radar test simulator. *2014 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*. IEEE, 2014, vol. 1, pp. 666–673. DOI: 10.5220/0005034506660673.
3. Huang H., Pan M., Lu Z. Hardware-in-the-loop simulation technology of wide-band radar targets based on scattering center model. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, vol. 28 (5), pp. 1476–1484.
4. Wayne D., McBride S., McKenna J. Multiple target, dynamic RF scene generator. *AMTA 2016 Proceedings*, Austin, TX, 2016, pp. 319–324.
5. Kuznetsov Yu.V., Baev A.B., Konovaluk M.A. Opredelenie parametrov mnogotochechnykh tselei po spektru radiolokatsionnogo izobrazheniya [Multi-point scatterer target identification using radar image spectrum]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta = Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 193–198.
6. Loginov A.A., Semenova M.Yu. Applying correlation method to the problem of passive amplitude monopulse direction finding. *IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*. IEEE, 2011, pp. 66–68. DOI: 10.1109/ICCSN.2011.6014850.
7. Guo Y., Li B., Cui W., Wu H. Comparative analysis of adjacent and maximum. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386490.
8. Zhou W., Li G., Xie J., Du Y. Generalized monopulse method with coherent integration in mechanical scanning radar. *CIE International Conference on Radar (RADAR)*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/RADAR.2016.8059571.
9. Mitrović N.M., Ponjavić M.M. Multichannel 2-D direction finding based on differential amplitude detection. *IEEE Sensors Journal*, 2015, vol. 15 (9), pp. 5064–5070. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2434876.
10. Skolnik M.I. *Radar handbook*. 3rd ed. New York, McGraw Hill, 2008 (Russ. ed.: *Spravochnik po radiolokatsii*. V 2 kn. Kn. 1. Ed. by M.I. Skolnik. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. 672 p.).
11. Leonov A.I., Fomichev K.I. *Monoimpul'snaya radiolokatsiya* [Monopulse radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 312 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Киселев Алексей Васильевич – родился в 1958 году, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Имеет более 160 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: nil_rtu@mail.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (b. 1958) – Doctor of Sciences (Eng.), a professor at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is author more 160 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@mail.ru).



Тайуров Антон Викторович – родился в 1997 году, аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование радиолокационных отражений, радиолокация, радиосвязь. Опубликовано 11 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: ya.antoha.rt@gmail.com).

Tayurov Anton Viktorovich (b. 1997) – Postgraduate student at the Department of Radio receivers and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling of radar reflections, radar, radio communication. He is author 11 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

*Статья поступила 21 октября 2024 г.
Received October 21, 2024*

To Reference:

Kiselev A.V., Tayurov A.V. Oshibka ustanovki uglovogo polozheniya radiolokatsionnogo ob"ekta, zameshchaemogo dvukhtocheynoi model'yu, pri ispol'zovanii anteny s raznostnoi diagrammoi napravlenosti [Error in setting the angular position of a radar object replaced by a two-point model when using an antenna with a difference radiation pattern]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 15–25. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-15-25.

УДК 621.396.94: 537.86.029: 52.65

**MATHEMATICAL MODELS OF RADIO WAVE PROPAGATION IN
HETEROGENEOUS ENVIRONMENTS FOR WIRELESS NETWORKS.
REVIEW.**

**Part 2. MATHEMATICAL MODELS
OF RADIO WAVE PROPAGATION IN FORESTS**

V.I. Popov

Riga Technical University, Riga, Latvia

The paper proposes a classification of mathematical models of radio wave propagation (RWP) in forests in a wide frequency range, which summarizes the results of the works of the author and numerous researchers on the effective complex dielectric constant of forests, effective operating and linear attenuation coefficients, radio path losses, effective differential absorption cross sections and scattering, as well as the specific effective area of backscattering by forest vegetation.

The rather complex problem of the influence of forests on the propagation of radio waves of various ranges is still extremely relevant today due to the widespread use of mobile and space radio communication systems, as well as solving the problems of radio monitoring of the earth's surface and radio introspection of objects in forests.

Keywords: propagation of radio waves in forests, mathematical models, effective complex dielectric constant of forests, effective attenuation coefficient, radio path losses, effective differential absorption and dispersion cross sections, effective backscattering areas of forest vegetations.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-26-47

Introduction

When solving electrodynamic problems of determining the levels of the electromagnetic field at the receiving point during the propagation of electromagnetic waves of various ranges in forests, various cases arise, for each of which it is necessary to build its own specific mathematical model, which allows us to give an approximate solution for determining the power of the radio signal at the receiving point (Rx).

The problem in this case is usually solved for the following main options (Fig. 1):

1) radio rays 1 – radio waves propagate from the transmitting station (Tx) from the forest in the direction of the receiver (or vice versa) – vertical end-to-end RWP,

2) radio rays 2 – radio waves propagate from a transmitting station located above a forest in the direction of the receiver – inclined RWP,

3) radio rays 3 – radio waves propagate from the transmitting station through the forest in the direction of the receiver (at different levels relative to the layers of the forest) – end-to-end RWP,

4) radio rays 4 – radio waves propagate from the transmitting station to the forest, are reflected from it in the direction of the receiver – vertical sensing.

When considering mathematical models of RWP in forests, the main attention is paid to RWP in wireless networks, especially in mobile communication networks.

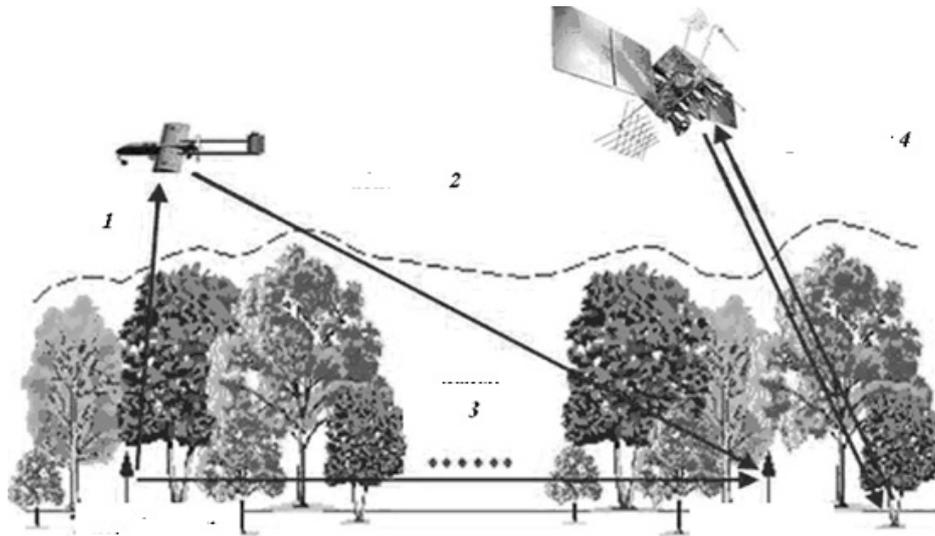


Fig. 1 – Radio wave propagation for four cases [1, 5, 36]:

1 – vertical end-to-end RWP (radio beams 1, bottom up or top down, Tx – aircraft Rx); 2 – inclined RWP (radio beams 2, from top to bottom, aircraft Tx – earth Rx); 3 – end-to-end RWP (radio beams 3, along of earth Tx-Rx); 4 – vertical sounding (radio rays 4, cosmic Tx or Rx – earth Rx or Tx)

Рис. 1 – Распространение радиоволн для четырех случаев [1, 5, 36]:

1 – вертикальная сквозная РВП (радиолучи 1, снизу вверх или сверху вниз, Tx – Rx самолета); 2 – наклонная РВП (2 радиолуча, сверху вниз, Tx самолета – Rx земли); 3 – сквозная РВП (радиолучи 3, вдоль земли Tx-Rx); 4 – вертикальное зондирование (радиолучи 4, космический Tx или Rx – земной Rx или Tx)

Before moving on to the classification of mathematical models of radio wave propagation (RWP) in forests, we present the main physical phenomena that arise in the process of RWP in forest vegetation. As follows from Fig. ,2 a, b, c.

Electromagnetic waves propagating in heterogeneous forest vegetation [1–81]:

1) attenuated in trunks, branches and leaves (needles) (with through propagation, may be arised fast and slow fading);

2) scattered (dispersed) on trunks, branches and leaves (needles);

3) diffracted at the edges of vegetation elements and at the tops of the forest canopy;

4) reflected from the forest floor [ground reflaction] and from the interfaces: the level of trunks – the base of the canopy, the upper level of the canopy – air, etc.;

5) acquire the type of lateral wave, with electromagnetic waves propagating over short distances in the forest, then “emerging” from the forest and propagating as a lateral wave above the forest canopy in the air, and then “diving” in the forest towards the receiving antenna;

6) reflected from the forest (in the case of vertical and inclined sounding);

7) change the polarization of electromagnetic waves (cross-polarization of electromagnetic waves occurs);

8) in the general case EMW acquire a multimode propagation character.

It should be noted that it is almost impossible to construct a mathematical model of the propagation of radio waves in a forest, taking into account the above phenomena. Therefore, numerous scientific studies devoted to this problem, as a rule, were built on the basis of highlighting several characteristic phenomena while neglecting the rest.

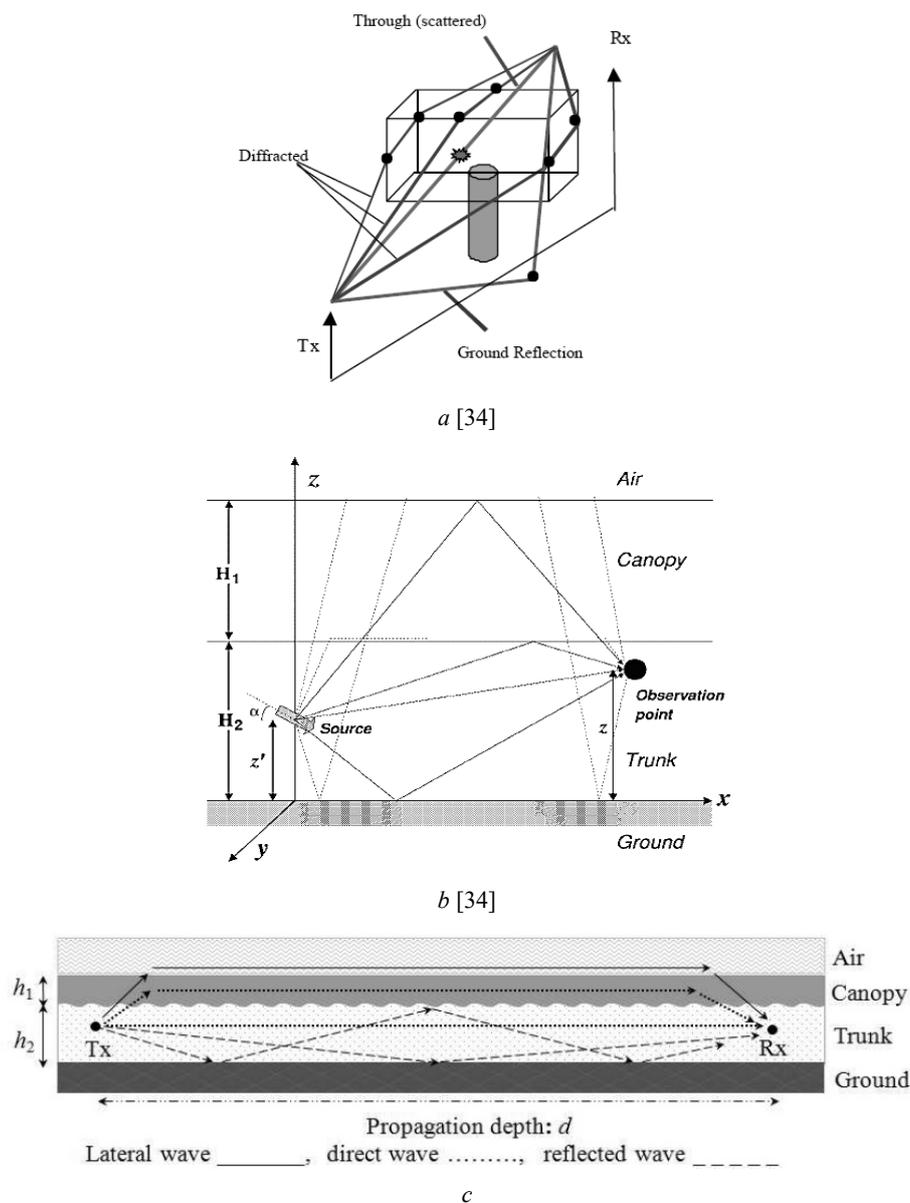


Fig. 2 – Basic processes during RWP in the forest, [Tx – transceiver, Rx – receiver]

Рис. 2 – Основные процессы при РВП в лесу, [Tx – передатчик, Rx – приемник]

1. Proposed scheme for classification of mathematical models of RWP in forests [5, 81]

Analysis of scientific literature [1-81] allows us to identify five main directions in mathematical modeling of radio wave propagation in forests and the development of the following mathematical models (Fig. 2):

1. Deterministic mathematical models (DMM).
2. Statistical mathematical models (SMM).

3. Semi-deterministic mathematical models (SDMM).
4. Semi-statistical mathematical models (SSMM).
5. Semi-empirical mathematical models (SEMM).
6. Empirical mathematical models (EMM).

In turn, these six directions, depending on the cases of propagation of a certain range of radio waves indicated in Fig. 1, are divided into a number of mathematical models most often used in practice (Fig. 3) [5, 81].

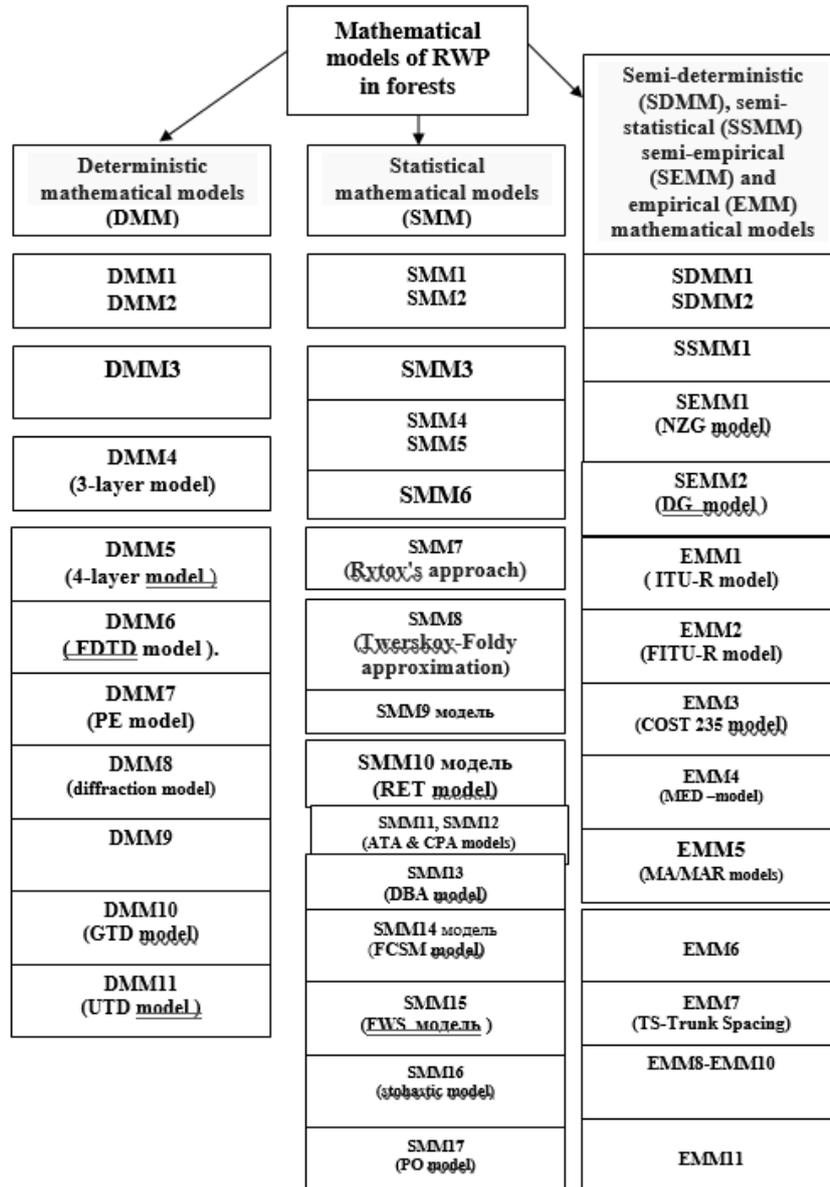


Fig. 3 – Mathematical models of radio wave propagation most often used in practice

Рис. 3 – Математические модели распространения радиоволн, наиболее часто используемые на практике

2. Brief description of the content of mathematical models

2.1. Deterministic mathematical models of radio wave propagation in forest environment

When constructing deterministic mathematical models (DMM – Determined Mathematical Models) of RWP in forest vegetation, Maxwell's equations are usually solved and the components of the electromagnetic field are determined under the conditions of monochromatic electromagnetic waves propagating in the forest, as in an inhomogeneous dielectric medium with losses. This makes it possible to evaluate the physical processes occurring during the propagation of radio waves and obtain approximate analytical expressions for the effective value of the attenuation coefficient or scattering area.

1. DMM1 model [1, 3] (deterministic mathematical model, which is based on the construction of an approximate mathematical model of end-to-end propagation of a vertically polarized monochromatic electromagnetic wave of the meter range in a forest area, representing a set of vertical weakly conducting cylinders of finite height, the influence of which on the resulting field at the receiving point comes down to the creation of secondary fields that interfere with the main field).

2. DMM2 model [4, 5] (a deterministic mathematical model, which is based on the assumption that the forest is a vertically oriented layered structure, while the wave equation is written for the averaged component of the electric field strength of a monochromatic vertically polarized electromagnetic wave (with end-to-end propagation of electromagnetic waves) and an expression is sought for the attenuation coefficient of EMW at a given operating wavelength).

3. DMM3 model [4, 5] (deterministic mathematical model, which is based on the assumption that the forest layer is a vertically oriented structure in space in the form of quasi-spherical trees (it is assumed that trees in spring and summer have a quasi-spherical shape) correctly located in space at the same time the wave equation is written for the averaged component of the electric field strength of a monochromatic vertically polarized electromagnetic wave (with end-to-end propagation of electromagnetic waves) and an expression is sought for the attenuation coefficient at a given operating wavelength).

4. DMM4 model [6–9] (a deterministic mathematical model, which is based on the assumption that the forest is a three-layer structure, while Maxwell's equations are solved for electromagnetic waves emitted by a dipole antenna located in the forest and propagating inside the forest in the direction of the receiving point, also located inside the forest (in this case, solutions to Maxwell's equations are sought using the dyadic method of the Green's function).

5. DMM5 model [10–14] (a deterministic mathematical model, which is based on the assumption that the forest is a four-layer structure, while Maxwell's equations are solved for electromagnetic waves emitted by a dipole antenna located in the forest and propagating inside the anisotropic forest in the direction of the receiving point, also located inside the forest (in this case, solutions to Maxwell's equations are sought using the dyadic method of the Green's function).

6. DMM6 model [15, 16] (a deterministic mathematical model using the well-known **FDTD – Finite Difference Time Domain method** – as a method for

numerically solving electrodynamics problems, based on non-standard discretization of Maxwell's equations in time and space).

7. DMM7 model [17–25] (a deterministic mathematical model that uses the **Parabolic Equation (PE) Method**) to simulate the propagation of electromagnetic waves in heterogeneous media, including vegetation).

8. DMM8 model [4, 23, 24] (deterministic mathematical model using the well-known Fresnel optical diffraction method on a wedge, Fig. 4).

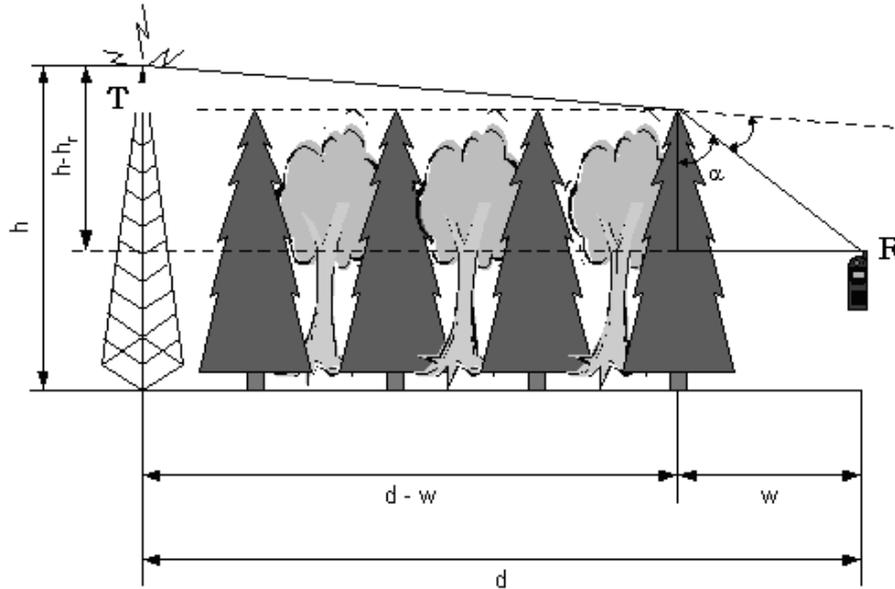


Fig. 4 – DMM8 model

Рис. 4 – Модель DMM8

9. DMM9 model [26, 27] (a deterministic mathematical model that uses the diffraction model of the RWP for a mixed path: from the transmitting base station to the receiving mobile station, taking into account the influence of two forests, Fig. 5).

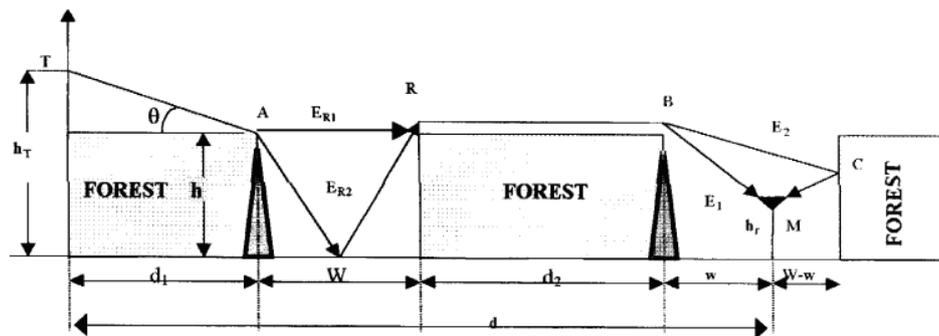


Fig. 5 – DMM9 model

Рис. 5 – Модель DMM9

10. DMM10 model [28–31] (deterministic mathematical diffraction model based on the GTD (**Geometrical Theory of Diffraction**) method – geometric theory of diffraction).

11. DMM11 model [32–34] (diffraction model based on the UTD (**Uniform Theory of Diffraction**) method – the unified theory of diffraction).

2.2. Statistical mathematical models of radio wave propagation in forest areas

In general, forests are heterogeneous environments with a random arrangement of plant elements of different shapes, sizes and parameters. Therefore, in the development of mathematical models of forests in recent years, various statistical approximations (statistical mathematical models – SMM – Statistical Mathematical Models) have been widely used.

1. SMM1 model [37] (Statistical mathematical model of radio wave scattering in forests for mobile communication systems (in the single scattering approximation)).

2. Statistical mathematical models of reflection and scattering of electromagnetic waves during radar sounding of the earth’s surface):

SMM2 model [38] (Statistical mathematical model of a finely rough reflective surface).

SMM3 model [38] (Statistical mathematical model of a reflective surface with large-scale irregularities).

SMM4 model [38] (Statistical mathematical model of a reflective surface with complex roughness).

SMM5 model [38] (Statistical mathematical model of electromagnetic waves reflection from a set of multiple linear reflectors)

SMM6 model [38] (Statistical mathematical model of electromagnetic waves reflection from “multiple” reflectors).

3. SMM7 model [39, 40] (Statistical mathematical model of radio wave propagation in forests using the Rytov approximation).

4. SMM8 model [40] (Statistical mathematical model of radio wave propagation in forests using the Tversky-Foldy theory).

5. SMM9 model [41, 42] (Statistical mathematical models of the reflection of radio waves from forests during microwave radiometry of vegetation [continuum and discrete medium approximations]).

6. SMM10 model [43, 44] (Statistical mathematical model based on RET theory (The Radiative Energy Transfer Theory), in which the energy transfer equation is defined as a change in the intensity of a radio signal propagating through a statistically quasi-homogeneous medium filled with random small diffusers).

7. SMM11 model [45–49] (Statistical mathematical model of radio wave propagation in forests using ATA theory (Average T-matrix Approximation – approximation of the ensemble averaged T-matrix), which uses quasi-static approximation and material equations for inhomogeneous forest environment are averaged over an ensemble of scatterers).

8. SMM12 model [45–49] (Statistical mathematical model of radio wave propagation in forests using the CPA theory (Coherent Potential Approximation), which uses quasi-static approximation and introduces the assumption that the difference in the

electromagnetic field in an inhomogeneous medium is negligible and averaged EMF over ensembles).

9. SMM13 model [74–79] (Statistical mathematical model of radio wave propagation in forests using the DBA theory (Distorted Born Approximation (DBA)). The DBA model is based on wave theory (approximation of solutions to Maxwell's equations) and considers the case the incidence of electromagnetic waves with a relatively long wavelength on a forest and their coherent backscattering (taken into account by the surface-volume interaction terms [75]). This model does not take into account the interaction between various plant elements during multiple scattering of electromagnetic waves.

10. SMM14 model [51, 54–58] (Statistical mathematical model of radio wave propagation in forests based on FCSM (Fractal-based Coherent Scattering Model) model that uses fractal geometry to describe the real structure of trees, modeling the interaction of electromagnetic waves with vegetation, using DBA, which determines the coherent component of the electromagnetic field, its attenuation and phase change under the influence of forest vegetation, and the Monte Carlo method for determining the statistical distribution of electromagnetic fields with a large number of implementations.

11. SMM15 model [50, 51, 64] (Statistical mathematical model of radio wave propagation in forests using the theory of FWS (Full Wave Solutions) or Full Wave Analysis – full wave solutions or full wave analysis), in which, for example, according to [51], based on the Monte Carlo method, the effects of multiple scattering from a large number of forest scatterers with subsequent interference at the point of receiving scattered electromagnetic waves and a lateral electromagnetic wave are simulated.

12. SMM16 model [52–54] (Statistical mathematical models of radio wave propagation in forests using 3D-Stochastic model of wave scattering in mixed areas with vegetation – 3D-stochastic model of wave scattering on a mixed path with vegetation, in which, for example [52], a forest model is used for a mixed route in a rural area, representing buildings and trees, while the buildings are represented as blocks, and trees are in the form of cylinders, and the entire propagation medium is assumed to be a medium with randomly oriented roughnesses on the earth's surface, while this model allows us to give approximate estimates of the total intensity of the electromagnetic field at the receiving point, scattered on inhomogeneities of the environment such as trees and buildings.

13. SDMM17 model [33, 36, 59, 60] (Statistical mathematical model based on the Physical Optics method, which is based on the Fresnel-Kirchhoff theory. As shown in [59], for mobile communication systems, in addition to calculating coherent component of the EMF at the point of reception, for a more accurate accounting of permissible losses in forest vegetation, include an incoherent component).

14. SDMM18 model [61] (Statistical mathematical model based on the MoM (Method of Moment) or BEM (Boundary Element Method). The MoM method uses numerical solutions of integral equations in boundary form).

2.3. Semi-deterministic mathematical models of radio wave propagation in forest areas

When constructing semi-deterministic mathematical models SDMM (Semi-Determined Mathematics Model) using RWP, which describe the end-to-end

propagation of radio waves (in the range from 100 MHz to 100 GHz) in forest vegetation, the concept of electromagnetic energy losses in the path (path loss) or losses during transmission loss in the form:

$$L_{rt} = 10 \cdot \lg \frac{P_r}{P_t} < 0$$

or

$$L_{tr} = 10 \cdot \lg \frac{P_t}{P_r} > 0,$$

where, respectively, P_t is the radiation power of the transmitter antenna and P_r is the signal power at the receiver input (very often, assuming that the efficiency of the transmitter, feeder path and antenna is close to unity, the radiation power of the P_t antenna is equal to the transmitter power).

The main semi-deterministic mathematical models that describe the end-to-end propagation of radio waves in forest vegetation include (Fig. 2):

1. SDMM1 model is a semi-deterministic mathematical model (similar to the well-known exponential model (EXD – EXponential Model) [1.59]), based on a single-beam model of RWP in free space plus energy losses in forest vegetation $L=L_0+\alpha_{mF} \cdot l_F$ [dB], with In this case, the effective value of the linear attenuation coefficient in a forest α_{mF} [dB/m]<0 for the semi-deterministic model is assumed to be constant for the corresponding operating frequency and type of forest vegetation.

2. SDMM2 model - a semi-deterministic mathematical model based on a two-beam model of RWP in a forest plus energy losses in forest vegetation for direct and reflected rays from the forest floor (at a constant effective value of the linear attenuation coefficient and the reflection coefficient from the forest floor for the corresponding operating frequency and type of forest vegetation).

2.4. Semi-statistical mathematical models of radio wave propagation in forests

Model **SSMM1 (Semi-Statistical Mathematics Model)** [5, 62] – semi-statistical mathematical model based on the assumption that at short distances between radio stations the coherent component predominates and power losses in the path are determined by the model **SDMM1**, and at large distances, the incoherent component of the electromagnetic field predominates, and to take it into account, expansion terms are introduced into the functional of power losses in the path, which determine additional losses in forest vegetation, while they are, in turn, functions of the operating wavelength, the average height of trees, the elevation heights of the transmitting and receiving antennas, etc.

2.5. Semi-empirical mathematical models for end-to-end propagation of radio waves in forests

When constructing semi-empirical mathematical models SEMM (Semi-Empirical Mathematics Model), describing end-to-end propagation of radio waves (in the range from 100 MHz to 40 MHz) in forest vegetation, as well as for deterministic models, the concept of electromagnetic energy losses in the path is usually or transmission loss obtained from experimental data.

The main semi-empirical mathematical models that describe the end-to-end propagation of radio waves in forest vegetation include (Fig. 2):

1) SEMM1 model [63,64] - a semi-empirical mathematical model based on the NZG model (**Non Zero Gradient Model**), in which (in the range of millimeter waves) energy losses in the path are considered due to changes in the linear attenuation coefficient α_{mF} in forest area from the initial α_{mF1} to the final α_{mF2} values, i.e. in the model assumes the existence of a gradient $\partial\alpha_{mF}/\partial l \neq 0$ in heterogeneous forest vegetation (with the effective value of the initial and final values of the linear attenuation coefficient found from experiments).

2) SEMM2 model [64] is a semi-empirical mathematical model based on the DG model (**Dual Gradient Model**), into which a number of parameters are introduced in the millimeter wave range that correct the NZG model, i.e. the existence of a gradient $\partial\alpha_{mF}/\partial l \neq 0$ in heterogeneous forest vegetation is also allowed (with the effective values of the initial and final values of the linear attenuation coefficient and correction parameters found from experiments).

2.6. Empirical mathematical models of radio wave propagation in forest areas

As the name suggests, empirical mathematical models **EMM (Empirical Mathematics Model)** of RWP in forests are based on the results of experimental studies of losses during the propagation of electromagnetic energy in paths passing through forest vegetation, they take into account the statistical characteristics of received signals, while requirements for the influence of geometry elements of the forest are weakened, and the analytical expressions themselves are significantly simplified. According to the **ITU-R Recommendations** [67], the following empirical mathematical models (used in the range from 200 MHz to 95 GHz) have found the greatest application in practice.

1. EMM1 model [1], based on the **ITU-R** empirical mathematical model, in which path losses are defined as a function:

$$L = L(f, r) = a \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^b \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^c, \text{ dB}, \quad (1)$$

where f is the operating frequency, $f_0 = 1$ GHz is the normalizing frequency, r is the distance between the transmitting and receiving antennas, (at < 400 m), $r_0 = 1$ m is the normalizing distance, coefficients a and power values b and c are selected during experiments, and for the ITU-R model they are equal: $a = 0.2$ dB, $b = 0.3$ and $c = 0.6$.

2. EMM2 model [64], based on the empirical mathematical model **FITU-R (Fitted ITU-R – refined ITU-R)**, in which path losses are also defined as a function: (6.1) $L = L(f, r)$ similar to the ITU-R model, but in the frequency range from 11.2 to 20 GHz (with a distance between the transmitting and receiving radio stations $d < 120$ m) with excellent coefficients and power-law values outside the foliage ($a = 0.37$ dB, $b = 0.18$, $c = 0.59$) and inside the foliage ($a = 0.39$ dB, $b = 0.39$, $c = 0.25$) of forest plants.

3. EMM3 model [64], based on the empirical mathematical model **COST235**, in which path losses are also defined as a function: (6.1) $L = L(f, r)$ similar to the ITU-R model (for the frequency range from 9.6 GHz to 57.6 GHz), but with different coefficients and power values outside the foliage ($a = 26.6$ dB, $b = -0.2$, $c = 0.5$) and inside the foliage ($a = 15.6$ dB, $b = -0.009$, $c = 0.26$) of forest plants.

4. EMM4 model [64,65], based on the empirical mathematical **MED (Modified Exponential Model)** model, in which path losses are also defined as a function: (6.1) similar to the ITU-R model, but with different coefficients and power values in the range of distances between the transmitting and receiving radio stations: at $0 < r < 14$ m ($a = 0.45$ dB, $b = 0.284$, $c = 1$), and at -14 m. $< r < 400$ m. ($a = 1.33$ dB, $b = 0.284$, $c = 0.588$) at normalizing frequency $f_0 = 1$ GHz.

5. EMM5 model [66], based on the empirical mathematical model **ITU-R P.833-2** (this model is called the **MA (Maximum Attenuation) MAR (Maximum Attenuation Rate)** model).

6. EMM6 model [42], based on an empirical mathematical model that determines the frequency dependence (in the frequency range from 100 to 1000 MHz) of the linear attenuation coefficient.

7. EMM7 model [67], based on the well-known empirical mathematical model **TS (Trunk Spacing - channel distance)** which is a modification of the MED model, which takes into account the density of forest vegetation.

8. The EMM8 model [70] is based on an empirical model used to calculate the amount of power loss due to the shadow effect for mobile communication systems in the UHF range.

9. EMM9 model [71] is based on an empirical model used to calculate the amount of power loss for the forest canopy for space mobile communication systems in the UHF range (870 MHz) and in the frequency ranges – L (1.6 GHz) and K (19.6 GHz).

10. The EMM10 model [72] is based on an empirical model used to calculate the amount of power loss for the forest canopy for space mobile communication systems in the frequency bands – L (1.6 GHz) and K (19.6 GHz).

11. EMM11 model [73] is based on an empirical model used to calculate the operating attenuation of electromagnetic waves in forests in the L(1.6 GHz) frequency range.

Conclusions

1. The classification scheme in Fig. 3 shows the main mathematical models that are most often used in approximate estimates of the effective complex dielectric constant of scaffolding, effective operating and linear attenuation coefficients, radio path losses, effective differential absorption and scattering cross sections, as well as specific effective area backscattering by forest vegetation during the propagation of radio waves of various ranges in forests.

2. The classifications of mathematical models of RRR in vegetation given in [34, 69, 68] (respectively, Fig. 6–8) are special cases of the classification scheme Fig. 3 proposed in [5].

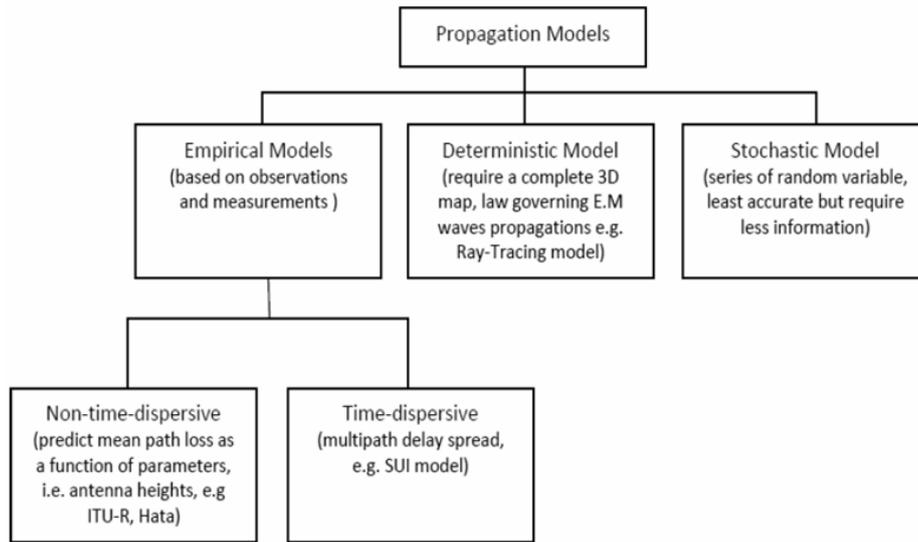


Fig. 6 – Generic vegetation model development from [69]

Рис. 6 – Разработка типовой модели растительности [69]

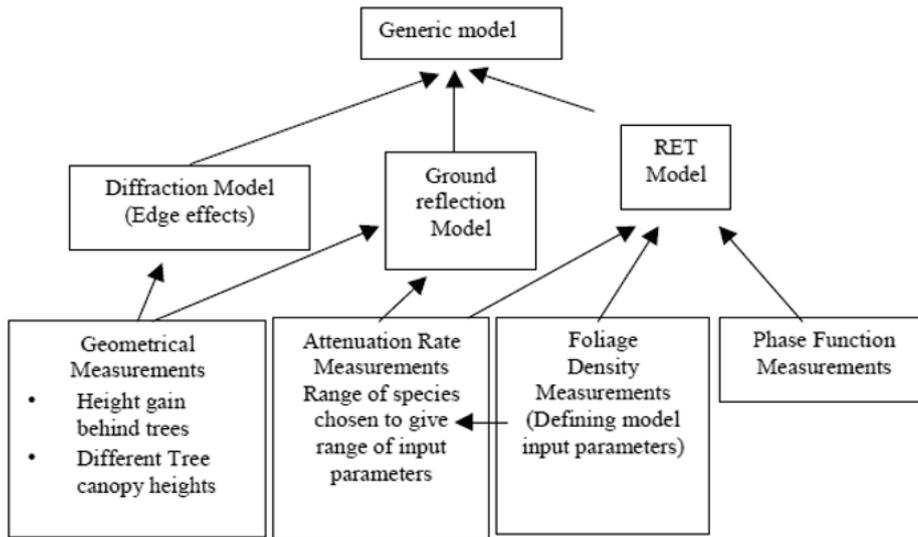


Fig. 7 – Generic vegetation model development from [34]

Рис. 7 – Разработка типовой модели растительности [34]

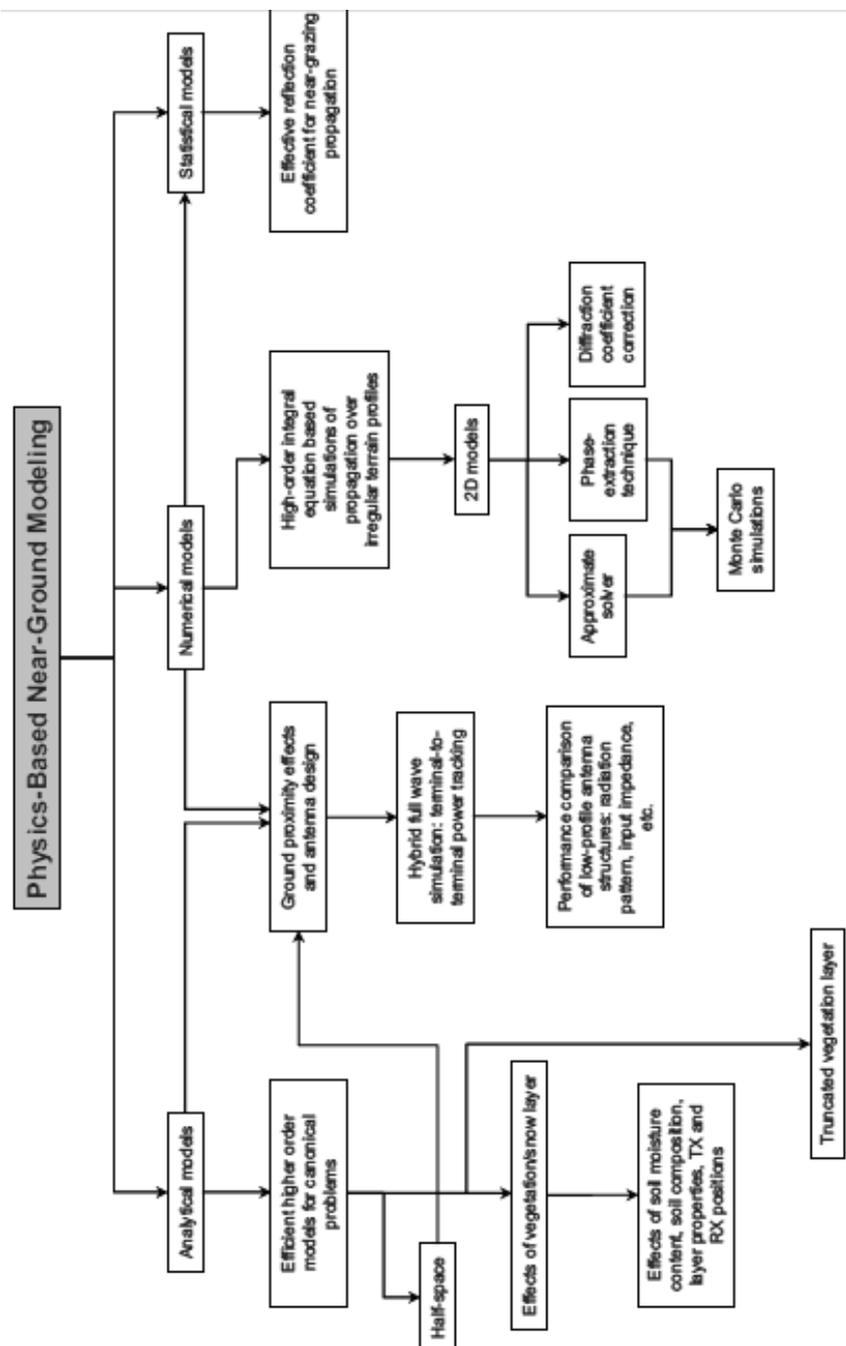


Fig. 8 – Generic vegetation model development from [68]

Рис. 8 – Разработка типовой модели растительности [68]

REFERENCES

1. Popov V.I. *Rasprostranenie radiovoln v lesakh* [Propagation of radio waves in forests]. Research report No. 3566/3731. Lviv Polytechnic Institute, Department of Theoretical Radio Engineering and Automatic Telecommunications. Lviv, 1981/1983. 120 p.
2. Popov V. UHF radio wave propagation through woodlands in cellular mobile communication systems. *The 44th International Scientific Conference at Riga Technical University*, October 11–13, Riga, Latvia, 2003, pp. 1–12.
3. Popov V. Mathematic model of VHF wave propagation in woodlands. *The 48th International Scientific Conference at Riga Technical University*, October, Riga, Latvia, 2007.
4. Popov V.I. *Osnovy sotovoi svyazi standarta GSM* [Basics of GSM cellular communication]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2005. 296 p.
5. Popov V.I. *Rasprostranenie radiovoln v lesakh* [Propagation of radio waves in forests]. Riga, RTU Publ., 2011. 548 p.
6. Cavalcante G.P.S., Giarola A.J. Optimization of radio communication in media with three layers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, vol. 31 (1), pp. 141–145.
7. Dunn J.M. Lateral wave propagation in a three-layered medium. *Radio Science*, 1986, vol. 21 (5), pp. 787–796.
8. Cavalcante G.P.S., Rogers D.A., Giardola A.J. Analysis of the electromagnetic wave propagation in multilayered media using dyadic Green's function. *Radio Science*, 1982, vol. 17 (3), pp. 503–508.
9. Cavalcante G.P.S., Rogers D.A., Giardola A.J. Radio loss in forests using a model with four layered media. *Radio Science*, 1983, vol. 18, pp. 691–695.
10. Lian H.X. UHF lateral wave loss in forests modeled by four-layered media. *Acta Electronica Sinica*, 1986, vol. 14 (5), pp. 12–20.
11. Lian H.X., Lewin L. UHF radio loss in forest modeled by four layered media with two anisotropic slabs. *1986 Antennas and Propagation Society International Symposium*, Philadelphia, PA, 1986, pp. 217–221.
12. Li L.-W., Yeo T.-S., Kooi P.-Sh., Leong M.-S. Radio wave propagation along mixed paths through a four-layered model of rain forest: an analytic approach. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1998, vol. 46 (7), pp. 1098–1111.
13. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, vol. 14 (3), pp. 302–307.
14. Taflove A., Brodwin M.E. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1975, vol. 23 (8), pp. 623–630.
15. Leontovich M.A., Fok V.A. Reshenie zadachi o rasprostraneni elektromagnitnykh voln vdol' poverkhnosti zemli po metodu parabolicheskogo uravneniya [Solution of the problem of electromagnetic wave propagation along the earth's surface using the parabolic equation method]. *Issledovaniya po rasprostranenyu radiovoln* [Research on radio wave propagation]. Moscow, AN SSSR Publ., 1948, iss. 2, pp. 13–39.
16. Souza J.F. de, Magno F.N.B., Valente Z.A., Costa J.C., Cavalcante G.P.S. Mobile radio propagation along mixed paths in forest environment using parabolic equation. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, vol. 51 (4), pp. 1133–1136.
17. Zelle A., Constantinou C.C. A 3D parabolic equation with non- reflecting boundary conditions. *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 1997)*: Proceedings, Boston, 1997, p. 288.
18. Mias C., Constantinou C. Modeling of plane wave transmission through a periodic array of cylinders with the parabolic equation method. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1998, vol. 18 (1), pp. 78–84.

19. Levy M.F., Zaporozhets A.A. Target scattering calculations with the parabolic equation method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, vol. 103 (2), pp. 735–741.
20. Levy M. *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation*. London, Institution of Electrical Engineers, 2000. 336 p.
21. Arshad K., Katsriku F., Lasebae A. Radiowave VHF propagation modelling in forest using finite elements. *2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies*, Damascus, Syria. IEEE, 2006, pp. 2146–2149.
22. Kalinin A.I., Cherenkova E.L. *Rasprostranenie radiovoln i rabota radiolinii* [Propagation of radio waves and operation of radio lines]. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. 439 p.
23. Holm P., Lundborg B., Waern A. *Parabolic equation technique in vegetation and urban environment*. Report FOI-R-1050-SE. Stockholm, Swedish Defence Research Agency, 2003.
24. Cavalcante G.P.S., Sanches M.A.R., Oliveira R.A.N. Mobile radio propagation along mixed paths in forest environment. *1999 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, 1999, vol. 1, pp. 320–324.
25. Tamir T. Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, vol. 25 (4), pp. 471–477.
26. Keller J.B. Geometrical theory of diffraction. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52 (2), pp. 116–130.
27. James G.L. *Geometrical theory of diffraction for electromagnetic waves*. London, UK, P. Peregrinus, 1986. 293 p.
28. Kumar P.B. Sunil, Ranganath G.S. Geometrical theory of diffraction – a historical perspective. *Current Science*, 1991, vol. 61 (1), pp. 22–27.
29. Borovikov V.A., Kimber B.Ye. *Geometrical theory of diffraction*. London, UK, Institute of Electrical Engineers, 1994. 390 p.
30. McNamara D.A., Pistorius C.W.I., Malherbe J.A.G. *Introduction to the uniform geometrical theory of diffraction*. Norwood, MA, Artech House, 1990. ISBN 0-89006-301-X.
31. Matschek R., Linot B., Sizun H. Model for wave propagation in presence of vegetation based on the UTD associating transmitted and lateral waves. *IEE National Conference on Antennas and Propagation*, York, UK, 1999, pp. 120–123.
32. Shukla A.K., Seville A., Ndzi D., Richter J., Eden D. Description of a generic vegetation attenuation model for 1-60GHz. *COST-Action 280 "Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems"*, 1st International Workshop, Malvern, UK, 2002.
33. Whitteker J.H. Physical optics and field-strength predictions for wireless systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, vol. 20 (3), pp. 515–522.
34. Wang F. *Physics-based modeling of wave propagation for terrestrial and space communications*. A diss. of Dr. of Philosophy (Electrical Engineering). – University of Michigan, 2006.
35. Popov V.I. *Tekhnicheskaya elektrodinamika. Konspekt leksii. (Matematicheskaya model' rasseyaniya radiovoln na lesnykh massivakh dlya sistem mobil'noi svyazi (v priblizhenii odnokratnogo rasseyaniya))* [Technical Electrodynamics. Lecture Notes. Mathematical model of radio wave scattering on forests for mobile communication systems (singlefold scattering approximation)]. Riga, RTU Publ., 2009. (E-version).
36. Mel'nikov Yu.A. *Radiolokatsionnye metody issledovaniya Zemli* [Radar methods of Earth research]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 264 p.
37. Popov V.I. Mathematical model for radiowave propagation in sparse forests: Rytov approximation. *Automatic Control and Computer Science*, 2009, vol. 43 (2), pp. 104–108.
38. Ishimaru A. *Wave propagation and scattering in random media*. In 2 vol. New York, Academic Press, 1978 (Russ. ed.: Isimaru A. *Rasprostranenie i rasseyanie voln v sluchaino-neodnorodnykh sredakh: v 2 t.* Moscow, Mir Publ., 1981).

39. Magazinnikova A.L. *Statisticheskie metody rascheta UKV polei v lesnykh raionakh*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Statistical methods for calculating VHF fields in forest areas. PhD phys. and math. sci. diss.]. Tomsk, TSU Publ., 1998. 130 p.
40. Chukhlantsev A.A. *SVCh radiometriya rastitel'nykh pokrovov*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Microwave radiometry of plant covers. Dr phys. and math. sci. diss.]. Moscow, IRE Publ., 2004. 196 p.
41. Fernandes T.R., Cladeirinha R.F.S., Al-Nuaimi M.O., Richter J.H. A discrete RET model for millimetre-wave propagation in isolated tree formations. *IEICE Transactions on Communications*, 2005, vol. E88-B (6), pp. 2411–2418.
42. Fernandes T.R., Cladeirinha R.F.S., Al-Nuaimi M.O., Richter J.H. Modelling radiowave propagation through vegetation media: a comparison between RET and dRET models. *The Second European Conference on Antennas and Propagation*, EuCAP 2007, Edinburgh, UK, 2007.
43. Tamasanis D. *Application of volumetric multi-scattering approximations of foliage media*. Interim Report RL-TR-91-433. Arcon Corporation, 1991. 37 p.
44. Papa R.J., Tamasanis D.T. A model for bistatic scattering of electromagnetic waves from foliage covered rough terrain. *NATO Workshop: Target and Cluster Scattering and their Effects on Military Radar Performance*, 6–10 May, 1991, pp. 4.1–4.7.
45. Blankenship G.L. *Stochastic modeling of em scattering from foliage*. Rep. RADC-TR-89 22. Rome Air Development Center, 1989. AD A213118.
46. Tamasanis D. *Effective dielectric constants of foliage media*. Rep. RADCTR-90-157. Rome Air Development Center, 1990. AD A226296.
47. VanBeek L.K.H. Dielectric behavior of heterogeneous systems. *Progress in Dielectrics*. Vol. 7. Cleveland, OH, CRC Press/Chemical Rubber Co., 1967.
48. Didascalou D., Younis M., Wiesbeck W. Millimeter-wave scattering and penetration in isolated vegetation structures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, vol. 38 (5), pp. 2106–2113.
49. Wang F., Sarabandi K. A physics-based statistical model for wave propagation through foliage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, vol. 55 (3), pp. 958–968.
50. Chizhik D., Ling J. Propagation over clutter: physical stochastic model. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56 (4), pp. 1071–1077.
51. Blaunstein N., Censor D., Katz D. Radio propagation in rural residential areas with vegetation. *Progress in Electromagnetics Research*, 2003, vol. 40, pp. 131–153.
52. Lin Y.-Ch., Sarabandi K. A Monte Carlo coherent scattering model for forest canopies using fractal-generated trees. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, vol. 37 (1), pp. 440–451.
53. Lin Y.-Ch., Sarabandi K. Retrieval of forest parameters using a fractal-based coherent scattering model and a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, vol. 37 (3), pp. 1415–1424.
54. Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. New York, W.H. Freeman, 1982.
55. Lin Y.-Ch. *A fractal-based coherent scattering and propagation model for forest canopies*. Ph.D. diss. Univeristy of Michigan, 1997.
56. Torrico S.A., Lang R.H. Wave propagation in a vegetated residential area using the distorted born approximation and the Fresnel-Kirchhoff approximation. *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, Berlin, Germany, 2009, pp. 1693–1696.
57. Koh I.S., Wang F., Sarabandi K. Estimation of coherent field attenuation through dense foliage including multiple scattering. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, vol. 41 (5), pp. 1132–1135.
58. Kovacs I.Z., Eggers P.C., Olesen K. Radio channel characterization for forest environments in the VHF and UHF frequency bands. *IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference*, Amsterdam, 1999, pp. 1387–1391.

59. Meng Y.S., Lee Y.H. Investigation of foliage effect on modern wireless communication systems: a review. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, vol. 105, pp. 313–332.
60. Rogers N.C., Seville A., Richter J., Ndzi D., Savage N., Caldeirinha R., Shukla A., Al-Nuaimi M.O., Craig K.H, Vilar E., Austin J. *A generic model of 1-60 GHz radio propagation through vegetation*. Tech. report. Radiocommunications Agency, May 2002.
61. Weissberger M.A. *An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by foliage: ECAC-TR-81-101*. Electromagnetic Compatibility Analysis Center, 1981.
62. Recommendation ITU-R P.833-2. *Attenuation in Vegetation*. International Telecommunication Union, 1999.
63. Recommendation ITU-R P.833-6. *Attenuation in Vegetation*. International Telecommunication Union, 2007.
64. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1980, vol. 29 (3), pp. 317–325.
65. Shahajahan M., Abdulla Hes-Shafi A.Q.M. *Analysis of propagation models for WiMAX at 3.5 GHz*. Thesis. Blekinge Institute of Technology, 2009. 62 p.
66. Vogel W.J., Goldhirsh J. Tree attenuation at 869 MHz derived from remotely piloted aircraft measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34 (12), pp. 1460–1464.
67. Goldhirsh J., Vogel W.J., Mobile satellite system fade statistics for shadowing and multipath from roadside trees at UHF and L-band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, vol. 37 (4), pp. 489–498.
68. Vogel W.J., Goldhirsh J. Earth-satellite tree attenuation at 20 GHz: foliage effects. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29 (18), pp. 1640–1641.
69. Cavdar I.H. UHF and L band propagation measurements to obtain log-normal shadowing parameters for mobile satellite link design. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, vol. 51 (1), pp. 126–130.
70. Chew W.C. *Waves and fields in inhomogeneous media*. New York, IEEE Press, 1995.
71. Saatchi S.S., McDonald K.C. Coherent effects in microwave backscattering models for forest canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, vol. 35 (4), pp. 1032–1044.
72. Kurum M., O'Neill P. Backscatter measurements over vegetation by ground-based microwave radars. *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Istanbul, Turkey, 2011.
73. Lang R.H., Sidhu J.S. Electromagnetic backscattering from a layer of vegetation: a discrete approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, vol. 21 (1), pp. 62–71.
74. Sarabandi K., Koh I.-S. Effect of canopy-air interface roughness on HF-VHF wave propagation in forest. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, vol. 50 (2), pp. 111–121.
75. Bellez S., Dahon C., Roussel H. Analysis of the main scattering mechanisms in forested areas: an integral representation approach for monostatic radar configurations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, vol. 47 (12), pp. 4153–4166.
76. Popov V.I. *Rasprostranenie radiovoln v lesakh (dlya sistem mobil'noi svyazi)*. Otchety po NIR, Grant № 04.1249 Akademii nauk Latviiiskoi Respubliki [Reports: LZP Grants № 04.1259. Radiowave propagation in forests investigations (for cellular mobile communication systems)]. Riga, RTU, 2004/2008.
77. Popov V.I. *Rasprostranenie radiovoln v lesakh* [Radio wave propagation in forests]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015. 392 p.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ
ОБЗОР**

**Часть 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
РАДИОВОЛН В ЛЕСАХ**

В.И. Попов

Рижский технический университет

В статье предложена классификация математических моделей распространения радиоволн (РРВ) в лесах в широком диапазоне частот, которая обобщает результаты работ автора и многочисленных исследователей по эффективной комплексной диэлектрической проницаемости лесов, эффективным рабочим и линейным коэффициентам затухания, потерям на трассе радиоизлучения, эффективным дифференциальным сечениям поглощения и рассеяния, а также удельной эффективной площади обратного рассеяния лесной растительностью.

Достаточно сложная проблема влияния лесов на распространение радиоволн различных диапазонов остается чрезвычайно актуальной и в наши дни в связи с широким распространением систем мобильной и космической радиосвязи, а также решением задач радиомониторинга земной поверхности и радиоинтроскопии объектов в лесах.

Ключевые слова: распространение радиоволн в лесах, математические модели, эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость лесов, эффективный коэффициент затухания, потери на трассе радиоизлучения, эффективные дифференциальные сечения поглощения и рассеивания, эффективные площади обратного рассеяния лесной растительности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-26-47

ЛИТЕРАТУРА

1. **Попов В.И.** Распространение радиоволн в лесах: отчет по НИР: № 3566/3731 / Львовский политехнический институт, кафедры теоретической радиотехники и автоматической электросвязи. – Львов, 1981/1983. – 120 с.
2. **Popov V.** UHF radio wave propagation through woodlands in cellular mobile communication systems // The 44th International Scientific Conference at Riga Technical University, October 11–13, 2003. – Riga, Latvia, 2003.
3. **Popov V.** Mathematic model of VHF wave propagation in woodlands // The 48th International Scientific Conference at Riga Technical University, October, 2007. – Riga Latvia, 2007.
4. **Попов В.И.** Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с. – ISBN 5-88405-068-2.
5. **Попов В.И.** Распространение радиоволн в лесах. – Рига: РТУ, 2011. – 548 с.
6. **Cavalcante G.P.S., Giarola A.J.** Optimization of radio communication in media with three layers // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1983. – Vol. 31 (1). – P. 141–145.
7. **Dunn J.M.** Lateral wave propagation in a three-layered medium // Radio Science. – 1986. – Vol. 21 (5). – P. 787–796.
8. **Cavalcante G.P.S., Rogers D.A., Giardola A.J.** Analysis of the electromagnetic wave propagation in multilayered media using dyadic Green's function // Radio Science. – 1982. – Vol. 17 (3). – P. 503–508.
9. **Cavalcante G.P.S., Rogers D.A., Giardola A.J.** Radio loss in forests using a model with four layered media // Radio Science. – 1983. – Vol. 18. – P. 691–695.
10. **Lian H.X.** UHF lateral wave loss in forests modeled by four-layered media // Acta Electronica Sinica. – 1986. – Vol. 14 (5). – P. 12–20.

11. **Lian H.X., Lewin L.** UHF radio loss in forest modeled by four layered media with two anisotropic slabs // 1986 Antennas and Propagation Society International Symposium, Philadelphia, PA. – IEEE, 1986. – P. 217–221.
12. Radio wave propagation along mixed paths through a four-layered model of rain forest: an analytic approach / L.-W. Li, T.-S. Yeo, P.-Sh. Kooi, M.-S. Leong // IEEE Transaction on antennas and propagation. – 1998. – Vol. 46 (7). – P. 1098–1111.
13. *Kane Yee.* Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. 14 (3). – P. 302–307.
14. *Taflove A., Brodwin M.E.* Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1975. – Vol. 23 (8). – P. 623–630.
15. **Леонтович М.А., Фок В.А.** Решение задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности земли по методу параболического уравнения // Исследования по распространению радиоволн. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. – Сб. 2. – С. 13–39.
16. Mobile radio propagation along mixed paths in forest environment using parabolic equation / J.F. de Souza, F.N.B. Magno, Z.A. Valente, J.C. Costa, G.P.S. Cavalcante // Microwave and Optical Technology Letters. – 2009. – Vol. 51 (4). – P. 1133–1136.
17. **Zelley A., Constantinou C.C.** A 3D parabolic equation with non-reflecting boundary conditions // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 1997): Proceedings. – Boston, 1997. – P. 288.
18. **Mias C., Constantinou C.** Modeling of plane wave transmission through a periodic array of cylinders with the parabolic equation method // Microwave and Optical Technology Letters. – 1998. – Vol. 18 (1). – P. 78–84.
19. **Levy M.F., Zaporozhets A.A.** Target scattering calculations with the parabolic equation method // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1998. – Vol. 103 (2). – P. 735–741.
20. **Levy M.** Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation. – London: Institution of Electrical Engineers, 2000. – 336 p.
21. **Arshad K., Katsriku F., Lasebae A.** Radiowave VHF propagation modelling in forest using finite elements // 2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies, Damascus, Syria. – IEEE, 2006. – P. 2146–2149.
22. **Калинин А.И., Черенкова Е.Л.** Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Связь, 1971. – 439 с.
23. **Holm P., Lundborg B., Waern A.** Parabolic equation technique in vegetation and urban environment. Report FOI-R-1050-SE. – Stockholm: Swedish Defence Research Agency, 2003.
24. **Cavalcante G.P.S., Sanches M.A.R., Oliveira R.A.N.** Mobile radio propagation along mixed paths in forest environment // 1999 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. – IEEE, 1999. – Vol. 1. – P. 320–324.
25. **Tamir T.** Radio wave propagation along mixed paths in forest environments // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1977. – Vol. 25 (4). – P. 471–477.
26. **Keller J.B.** Geometrical theory of diffraction // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52 (2). – P. 116–130.
27. **James G.L.** Geometrical theory of diffraction for electromagnetic waves. – London, UK: P. Peregrinus, 1986. – 293 p.
28. **Kumar P.B. Sunil, Ranganath G.S.** Geometrical theory of diffraction – a historical perspective // Current Science. – 1991. – Vol. 61 (1). – P. 22–27.
29. **Borovikov V.A., Kinber B.Ye.** Geometrical theory of diffraction. – London, UK: Institute of Electrical Engineers, 1994. – 390 p.
30. **McNamara D.A., Pistorius C.W.I., Malherbe J.A.G.** Introduction to the uniform geometrical theory of diffraction. – Norwood, MA: Artech House, 1990. – ISBN 0-89006-301-X.

31. **Matschek R., Linot B., Sizun H.** Model for wave propagation in presence of vegetation based on the UTD associating transmitted and lateral waves // IEE National Conference on Antennas and Propagation. – York, UK, 1999. – P. 120–123.
32. Description of a generic vegetation attenuation model for 1-60GHz / A.K. Shukla, A. Seville, D. Ndzi, J. Richter, D. Eden // COST-Action 280 “Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems”, 1st International Workshop. – Malvern, UK, 2002.
33. **Whitaker J.H.** Physical optics and field-strength predictions for wireless systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2002. – Vol. 20 (3). – P. 515–522.
34. **Wang F.** Physics-based modeling of wave propagation for terrestrial and space communications: a diss. of Dr. of Philosophy (Electrical Engineering). – University of Michigan, 2006.
35. **Попов В.И.** Техническая электродинамика. Конспект лекций. (Математическая модель рассеяния радиоволн на лесных массивах для систем мобильной связи (в приближении однократного рассеяния)). – Рига: РТУ, 2009. – Е-версия.
36. Радиолокационные методы исследования Земли / под ред. Ю.А. Мельникова. – М.: Советское радио, 1980. – 264 с.
37. **Ропов V.I.** Mathematical model for radiowave propagation in sparse forests: Rytov approximation // Automatic Control and Computer Science. – 2009. – Vol. 43 (2). – P. 104–108.
38. **Исмару А.** Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: в 2 т. – М.: Мир, 1981.
39. **Магазинникова А.Л.** Статистические методы расчета УКВ полей в лесных районах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск: ТГУ, 1998. – 130 с.
40. **Чухланцев А.А.** СВЧ радиометрия растительных покровов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М.: ИПЭ, 2004. – 196 с.
41. A discrete RET model for millimetre-wave propagation in isolated tree formations / T.R. Fernandes, R.F.S. Cladeirinha, M.O. Al-Nuaimi, J.H. Richter // IEICE Transactions on Communications. – 2005. – Vol. E88-B (6). – P. 2411–2418.
42. Modelling radiowave propagation through vegetation media: a comparison between RET and dRET models / T.R. Fernandes, R.F.S. Cladeirinha, M.O. Al-Nuaimi, J.H. Richter // The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007. – Edinburgh, UK, 2007.
43. **Tamasanis D.** Application of volumetric multi-scattering approximations of foliage media. Interim Report RL-TR-91-433. – Arcon Corporation, 1991. – 37 p.
44. **Papa R.J., Tamasanis D.T.** A model for bistatic scattering of electromagnetic waves from foliage covered rough terrain // NATO Workshop: Target and Cluster Scattering and their Effects on Military Radar Performance, 6–10 May. – 1991. – P. 4.1–4.7.
45. **Blankenship G.L.** Stochastic modeling of EM scattering from foliage. Rep. RADC-TR-89 22. – Rome Air Development Center, 1989. – AD A213118.
46. **Tamasanis D.** Effective dielectric constants of foliage media. Rep. RADCTR-90-157. – Rome Air Development Center, 1990. – AD A226296.
47. **VanBeek L.K.H.** Dielectric behavior of heterogeneous systems // Progress in Dielectrics. Vol. 7. – Cleveland, OH: CRC Press/Chemical Rubber Co., 1967.
48. **Didascalou D., Younis M., Wiesbeck W.** Millimeter-wave scattering and penetration in isolated vegetation structures // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2000. – Vol. 38 (5). – P. 2106–2113.
49. **Wang F., Sarabandi K.** A physics-based statistical model for wave propagation through foliage // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2007. – Vol. 55 (3). – P. 958–968.
50. **Chizhik D., Ling J.** Propagation over clutter: physical stochastic model // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 2008. – Vol. 56 (4). – P. 1071–1077.
51. **Blaunstein N., Censor D., Katz D.** Radio propagation in rural residential areas with vegetation // Progress in Electromagnetics Research. – 2003. – Vol. 40. – P. 131–153.

52. **Lin Y.-Ch., Sarabandi K.** A Monte Carlo coherent scattering model for forest canopies using fractal-generated trees // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1999. – Vol. 37 (1). – P.440–451.
53. **Lin Y.-Ch., Sarabandi K.** Retrieval of forest parameters using a fractal-based coherent scattering model and a genetic algorithm // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1999. – Vol. 37 (3). – P. 1415–1424.
54. **Mandelbrot B.** *The fractal geometry of nature*. – New York: W.H. Freeman, 1982.
55. **Lin Y.-Ch.** A fractal-based coherent scattering and propagation model for forest canopies: Ph.D. diss. – University of Michigan, 1997.
56. **Torricco S.A., Lang R.H.** Wave propagation in a vegetated residential area using the distorted born approximation and the Fresnel-Kirchhoff approximation // 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany. – IEEE, 2009. – P. 1693–1696.
57. **Koh I.S., Wang F., Sarabandi K.** Estimation of coherent field attenuation through dense foliage including multiple scattering // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 41 (5). – P. 1132–1135.
58. **Kovacs I.Z., Eggers P.C., Olesen K.** Radio channel characterization for forest environments in the VHF and UHF frequency bands // *IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference*, Amsterdam. – IEEE, 1999. – P. 1387–1391.
59. **Meng Y.S., Lee Y.H.** Investigation of foliage effect on modern wireless communication systems: a review // *Progress in Electromagnetics Research*. – 2010. – Vol. 105. – P. 313–332.
60. A generic model of 1-60 GHz radio propagation through vegetation. Tech. report / N.C. Rogers, A. Seville, J. Richter, D. Ndzi, N. Savage, R. Caldeirinha, A. Shukla, M.O. Al-Nuaimi, K.H. Craig, E. Vilar, J. Austin. – Radiocommunications Agency. – May 2002.
61. **Weissberger M.A.** An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by foliage: ECAC-TR-81-101. – Electromagnetic Compatibility Analysis Center, 1981.
62. Recommendation ITU-R P.833-2. Attenuation in Vegetation. – International Telecommunication Union, 1999.
63. Recommendation ITU-R P.833-6. Attenuation in Vegetation. – International Telecommunication Union, 2007.
64. **Hata M.** Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 1980. – Vol. 29 (3). – P. 317–325.
65. **Shahjahan M., Abdulla Hes-Shafi A.Q.M.** Analysis of propagation models for WiMAX at 3.5 GHz: thesis. – Blekinge Institute of Technology, 2009. – 62 p.
66. **Vogel W.J., Goldhirsh J.** Tree attenuation at 869 MHz derived from remotely piloted aircraft measurements // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1986. – Vol. 34 (12). – P. 1460–1464.
67. **Goldhirsh J., Vogel W.J.** Mobile satellite system fade statistics for shadowing and multipath from roadside trees at UHF and L-band // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1989. – Vol. 37 (4). – P. 489–498.
68. **Vogel W.J., Goldhirsh J.** Earth-satellite tree attenuation at 20 GHz: foliage effects // *Electronics Letters*. – 1993. – Vol. 29 (18). – P. 1640–1641.
69. **Cavdar I.H.** UHF and L band propagation measurements to obtain log-normal shadowing parameters for mobile satellite link design // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2003. – Vol. 51 (1). – P. 126–130.
70. **Chew W.C.** *Waves and fields in inhomogeneous media*. – New York: IEEE Press, 1995.
71. **Saatchi S.S., McDonald K.C.** Coherent effects in microwave backscattering models for forest canopies // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1997. – Vol. 35 (4). – P. 1032–1044.
72. **Kurum M., O'Neill P.** Backscatter measurements over vegetation by ground-based microwave radars // 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey. – IEEE, 2011.

73. **Lang R.H., Sidhu J.S.** Electromagnetic backscattering from a layer of vegetation: a discrete approach // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1983. – Vol. 21 (1). – P. 62–71.
74. **Sarabandi K., Koh I.-S.** Effect of canopy-air interface roughness on HF-VHF wave propagation in forest // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2002. – Vol. 50 (2). – P. 111–121.
75. **Bellez S., Dahon C., Roussel H.** Analysis of the main scattering mechanisms in forested areas: an integral representation approach for monostatic radar configurations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47 (12). – P. 4153–4166.
76. **Попов В.И.** Распространение радиоволн в лесах (для систем мобильной связи). Отчеты по НИР, Грант № 04.1249 Академии наук Латвийской Республики. – Рига: Рижский технический университет, 2004/2008 гг.
77. **Попов В.И.** Распространение радиоволн в лесах. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 392 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Попов Валентин Иванович – родился в 1937 году, д-р техн. наук, профессор Рижского технического университета. Область научных интересов: телекоммуникации. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: Латвия, ЛВ-1048, Рига, ул. Кипсалас, д. 6А. E-mail: popovs@latnet.lv).

Popov Valentin Ivanovich (b. 1937) – Doctor of Sciences (Eng.), Hab. Doctor of Physics (Dr. habil. phys.), Professor in the Riga Technical University. His research interests are currently focused on telecommunication. He is the author of 150 scientific papers. (Address: 6A, Kipsalas Street, Riga LV-1048, Latvia. E-mail: popovs@latnet.lv).

Статья поступила 18 октября 2024 г.

Received October 16, 2024

To Reference:

Popov V.I. Matematicheskie modeli rasprostraneniya radiovoln v geterogennykh sredakh dlya besprovodnykh setei. Obzor. Chast' 2. Matematicheskie modeli rasprostraneniya radiovoln v lesakh [Mathematical models of radio wave propagation in heterogeneous environments for wireless networks. Review. Part 2. Mathematical models of radio wave propagation in forests]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 26–47. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-26-47.

УДК 616.728.2-089.28

**ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЯ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА****В.Н. Васюков¹, М.А. Райфельд¹, Д.О. Соколова¹,
Б.Р. Таштанов², В.В. Павлов²**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*Новосибирский научно-исследовательский институт
травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна*

Одна из проблем, связанных с эндопротезированием тазобедренного сустава, заключается в том, что эндопротез подвергается значительным механическим нагрузкам, что может привести к его разрушению. Ревизионные операции, направленные на выяснение состояния протеза, сложны и дороги, кроме того, они сопряжены с необходимостью прибытия пациента в медицинское учреждение и его госпитализации. Предлагается подход к диагностике эндопротеза тазобедренного сустава в процессе обычной жизнедеятельности пациента, основанный на анализе вибрационных и звуковых колебаний, снимаемых с поверхности тела с помощью разработанного для этой цели устройства на основе трехосевого акселерометра. Устройство для регистрации вибрационных и звуковых колебаний имеет малые габариты и массу, закрепляется на подвздошной кости и практически не ограничивает движений пациента в процессе регистрации сигналов. Сигналы в цифровой форме записываются на карту памяти, которая после проведения измерений может быть извлечена из устройства и использована для переноса записи в компьютер для обработки и анализа. Анализ записей сигналов, полученных экспериментально, позволил выделить признаки различных дефектов (частичное истирание полиэтиленового вкладыша, полное истирание вкладыша и расшатывание ножки протеза в области крепления его к бедренной кости). Предложены статистики для принятия решения при проверке гипотез о наличии/отсутствии этих дефектов. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: эндопротез, тазобедренный сустав, диагностика, акселерометр.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-48-63

Введение

Эндопротезирование тазобедренного сустава является эффективным и часто единственным способом восстановления утраченной функции конечности. Одна из проблем, связанных с эндопротезированием, заключается в том, что в процессе эксплуатации эндопротез подвергается значительным механическим нагрузкам, что может привести к его разрушению. Изменения в структуре материала эндопротеза накапливаются постепенно и в конце концов приводят к его внезапному разрушению. В этом случае требуется срочная операция, которая может быть достаточно сложной. Известно [1, 2], что звуковые колебания (шумы, скрипы, хруст, щелчки), сопровождающие эксплуатацию эндопротеза тазобедренного сустава (ЭТБС), могут служить признаком его предстоящего разрушения. Поэтому актуальным является исследование характеристик таких колебаний с целью прогнозирования состояния ЭТБС, так как своевременное обнаружение предвестника разрушения позволяет избежать крайне негативных последствий в виде необходимости удаления обломков и т. п. Кроме того, известен случай, когда скрип свидетельствовал об уже произошедшем разрушении вкладыша эндопротеза [6]. Желает

тельность мониторинга состояния эндопротеза в процессе нормальной жизнедеятельности пациента (*in vivo*) подробно обосновывалась в обзоре [9].

В работе предлагается подход к анализу вибрационных и звуковых колебаний, возникающих при нагружении имплантированного эндопротеза в процессе обычной жизнедеятельности пациента и устройство, разработанное для их регистрации.

1. Строение эндопротеза тазобедренного сустава

Эндопротез тазобедренного сустава включает несколько частей. Вертлужный компонент (чашка) с вкладышем (рис. 1, б) заменяет суставную поверхность вертлужной впадины (рис. 1, а). Бедренный компонент, включающий головку и ножку, заменяет головку и шейку бедренной кости. Головка и вкладыш образуют пару трения. Сферическая форма головки и внутренней поверхности вкладыша обеспечивает возможность движений в разных плоскостях (многоосевые движения).

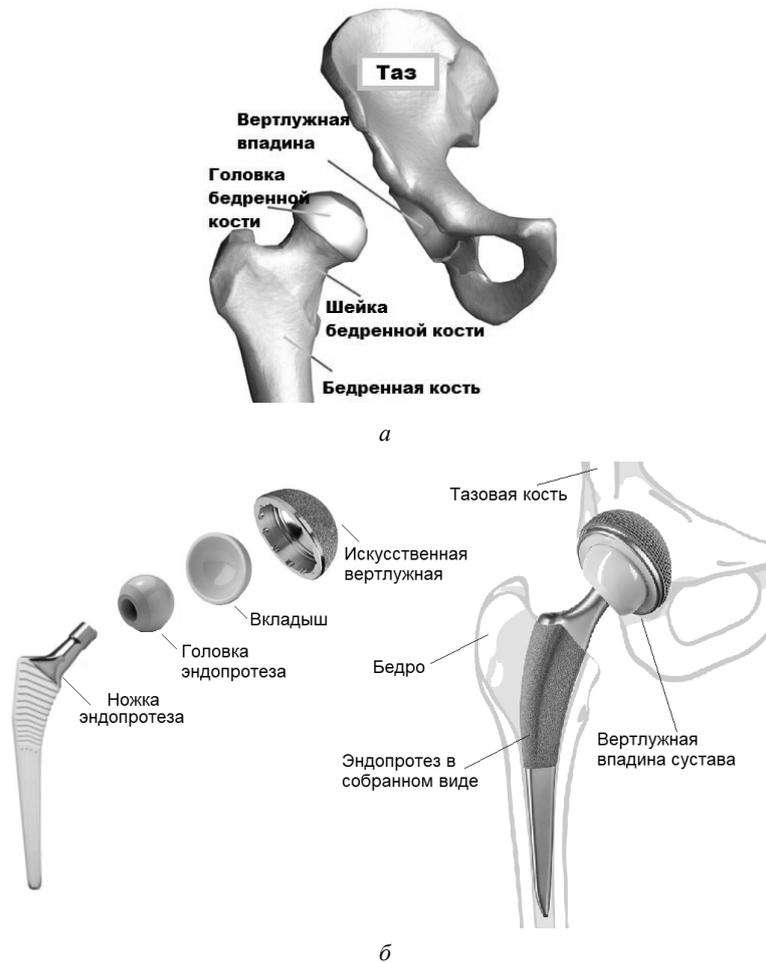


Рис. 1 – Части тазобедренного сустава (а) и части эндопротеза (б)

Fig. 1 – Parts of the hip joint (a) and parts of the endoprosthesis (b)

В эндопротезах применяются различные сочетания материалов: металл–металл, металл–пластик, керамика–керамика и другие. В настоящее время наиболее широко применяются эндопротезы с парой трения керамика–керамика. Они отличаются долговечностью, нетоксичностью и гипоаллергенностью, обеспечивают надежное сращение с костью при установке бесцементным методом. Однако для таких эндопротезов характерен риск разрушения (раскола), и в процессе износа пары трения часто проявляются слышимые звуки, имеющие характер скрипа [2]. Отмечается, что такие звуки негативно сказываются на самочувствии пациентов, и что некоторые клиники даже отказываются в связи с этим от использования эндопротезов типа керамика–керамика (ceramic-on-ceramic, CoC) [3, 5]. В то же время эти звуки могут служить предвестниками разрушения эндопротеза, если удастся установить связь динамики характера звуков и степени деградации материала.

О возможности прогнозирования разрушения эндопротеза на основе анализа скрипов и других колебаний упоминалось в работах [3, 4]. В [4] описан случай, когда благодаря скрипу, слышимому пациентом, был обнаружен перелом керамической вставки, при этом рентгенография, компьютерная томография и ультразвуковое исследование не выявили какого-либо повода для ревизионной операции.

Частотный состав звуков, издаваемых парой трения керамика–керамика, исследовался в работе [3]. Авторы этой работы приводят данные, полученные экспериментально в условиях периодического нагружения эндопротеза при отсутствии смазки, а также при наличии смазки водой и сывороткой. В отсутствие смазки были зафиксированы шум с частотой около 800 Гц и скрип частотой от 2 до 9 кГц. При использовании в качестве смазки сыворотки наблюдался скрип частотой около 7 кГц.

Анализ звуковых и вибрационных колебаний (сигналов) может быть использован также для обнаружения других дефектов, возникающих и развивающихся постепенно после установки ЭТБС, таких как значительный износ пары трения. При этом происходит постепенное увеличение зазора между головкой эндопротеза и вкладышем, в результате чего в процессе ходьбы происходит свободное перемещение головки относительно вкладыша, сопровождающееся ударом. Другим дефектом, проявляющимся в виде вибрационных колебаний, является расшатывание ножки эндопротеза в месте соединения ее с бедренной костью.

Таким образом, представляется актуальным анализ механических колебаний, возникающих в ЭТБС в процессе обычной жизнедеятельности пациента. При этом важно, чтобы движения пациента были максимально близкими к естественным. Поэтому устройство регистрации колебаний должно иметь минимальные массогабаритные характеристики, иметь автономное питание и не требовать проводных соединений с компьютером, который используется для анализа сигналов.

2. Устройство для регистрации колебаний, возникающих при движениях эндопротеза

При разработке устройства было учтено требование минимального неудобства для пациента с эндопротезом тазобедренного сустава, в соответствии с чем была выбрана конструкция, позволяющая пациенту свободно передвигаться и совершать обычные движения. Устройство имеет малые габариты и вес и может закрепляться на теле пациента в области подвздошной кости при помощи лейкопластыря или повязки. Функциональная схема устройства показана на рис. 2.

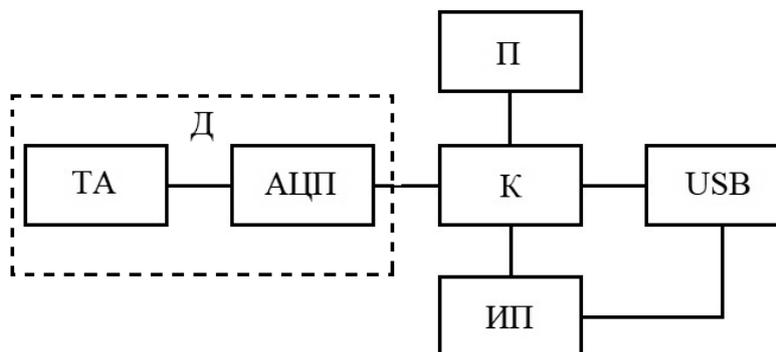


Рис. 2 – Функциональная схема регистрирующего устройства

Fig. 2 – Functional diagram of the recording device

Устройство содержит датчик Д, в состав которого входят трехосевой акселерометр ТА и аналого-цифровой преобразователь АЦП, управляющий микроконтроллером К, запоминающее устройство ЗУ, usb-порт USB и источник питания ИП. Трехосевой акселерометр преобразует значения ускорения по трем взаимно перпендикулярным осям в электрическое напряжение. Полученные электрические сигналы преобразуются в АЦП в три цифровые последовательности, которые записываются в память (ЗУ). При заполнении памяти или по истечении заданного временного интервала данные из памяти передаются через usb-порт в компьютер для анализа. Источником питания для всех элементов схемы служит аккумулятор.

Акселерометр реагирует на собственное ускорение, поэтому он соединяется с АЦП гибким кабелем для обеспечения минимальной инерционности. Остальные узлы смонтированы на общей печатной плате.

В качестве датчика была использована микросхема LSM6DS33, включающая трехосевой акселерометр и АЦП. Максимальная частота следования цифровых отсчетов равна 6,66 кГц, таким образом, устройство может регистрировать колебания с частотами до 3,33 кГц. Микросхема имеет компактные размеры (3 мм × 3 мм × 0,86 мм) и вес около 0,1 грамма. Запоминающее устройство реализовано в виде съемной карты памяти типа microSD. Такое решение дает дополнительное преимущество – возможность переноса данных из памяти устройства в компьютер через кардридер. Поскольку flash-память при записи требует сравнительно больших токов, в качестве источника питания выбран литий-полимерный аккумулятор, заряжаемый через usb-порт.

3. Результаты экспериментов

Разработанное устройство было использовано для получения записей вибрационных и звуковых (до 3,33 кГц) колебаний.

Рассмотрим далее возможность использования измерений величины ускорения трехкоординатным акселерометром для анализа состояния искусственного тазобедренного сустава. Миниатюрный датчик устройства (MEMS акселерометр) крепится в области вертлужной кости или подвздошной кости с помощью клейкой ленты или специального клея. Трехмерный сигнал этого датчика $\mathbf{s}(t) = [s_x(t), s_y(t), s_z(t)]$ пропорционален зависящему от времени вектору ускорения $\mathbf{a}(t)$, спроецированному на три взаимно ортогональные пространственные

оси датчика x, y, z . Сигнал, полученный от акселерометра, преобразуется в цифровой векторный сигнал $\mathbf{s}[n] = (s_x[n], s_y[n], s_z[n])$, где n – номер отсчета. Примеры такого сигнала, полученные при ходьбе, а также выполнении специальных упражнений (приседания и отведения), производимых тремя пациентами, приведены на рис. 3. На всех графиках, приводимых ниже, по горизонтальной оси откладывается номер n отсчета сигнала.

Вследствие того, что датчик при креплении к телу пациента может быть сориентирован случайным образом и от этого случайного фактора желательно избавиться, целесообразно перейти от векторного сигнала к скалярному:

$$s[n] = \sqrt{s_x^2[n] + s_y^2[n] + s_z^2[n]}. \quad (1)$$

На рис. 4 приведены графики реализаций сигнала $s[n]$ для различных пациентов, соответствующие рис. 3. Можно отметить постоянство среднего уровня сигнала $s[n]$, соответствующего значению ускорения свободного падения ($9,8 \text{ м/с}^2$).

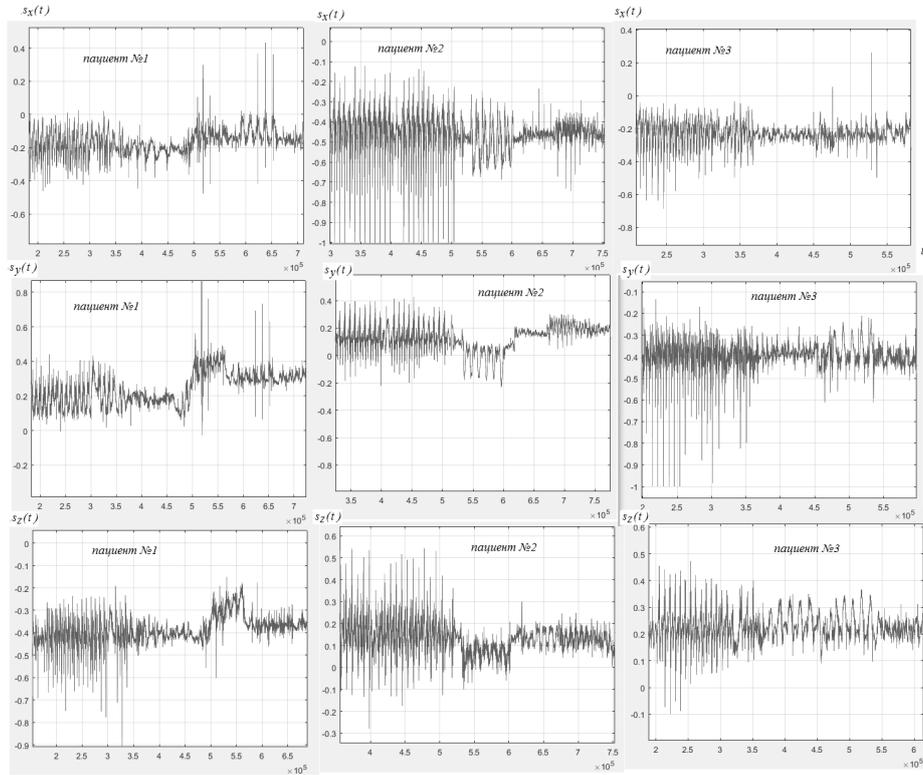


Рис. 3 – Реализации сигналов трехосевого акселерометра, полученные от различных пациентов

Fig. 3 – Realizations of three-axis accelerometer signals obtained from different patients

На основании рис. 4 можно сделать вывод о значительном сходстве реализаций сигнала $s[n]$ при одинаковых типах движений различных пациентов.

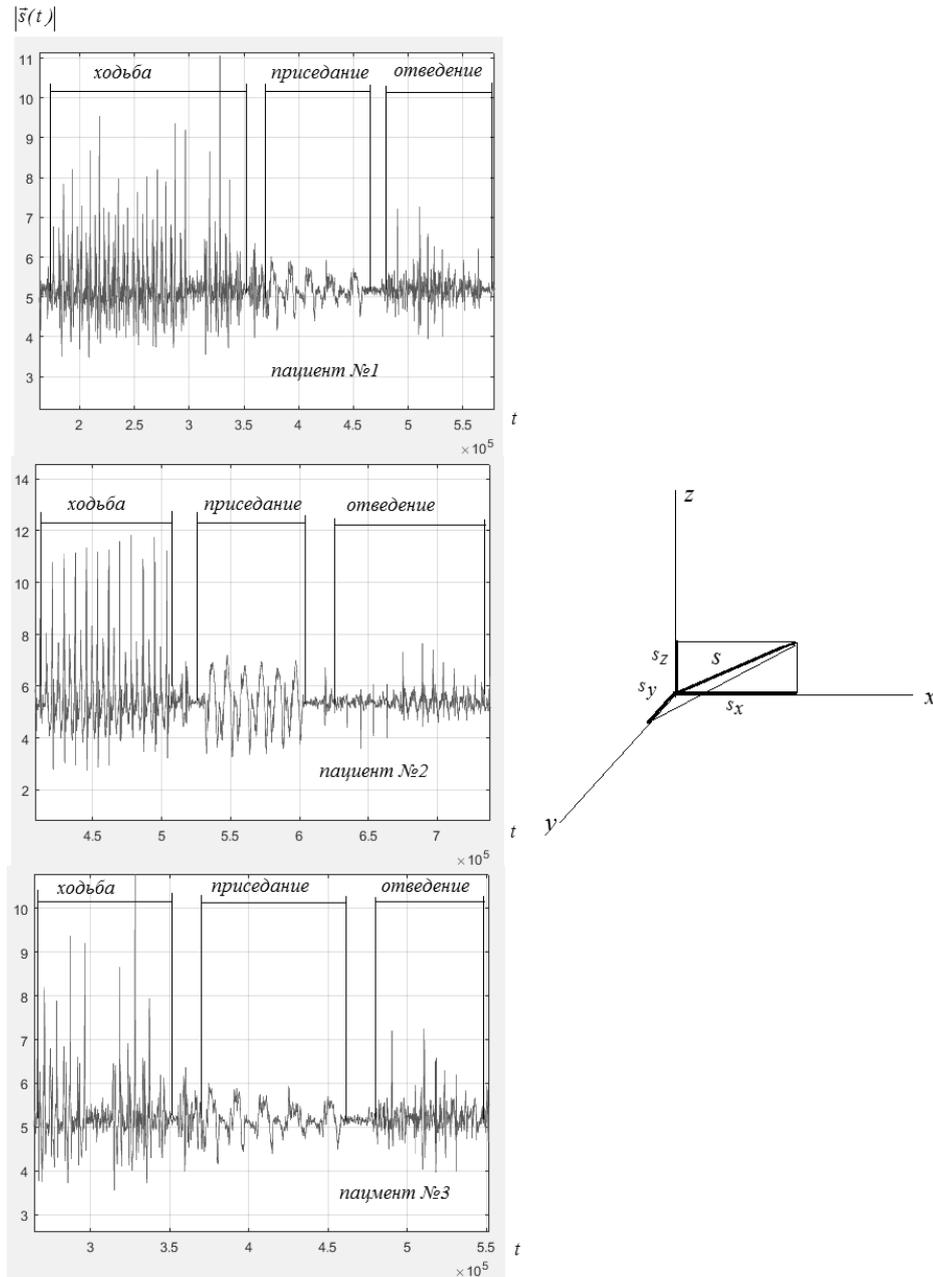


Рис. 4 – Реализации сигнала $s[n]$, полученного от различных пациентов

Fig. 4 – Realizations of the signal obtained from different patients

Рассмотрим различные варианты повреждений эндопротеза и соответствующие им изменения сигналов, регистрируемых акселерометром. Далее ограничим рассмотрение только сигналами, полученными при ходьбе. Сигнал $s[n]$ в этом случае имеет квазипериодический характер (рис. 5). Для краткости будем называть участки сигнала в окрестностях локальных максимумов импульсами шага.

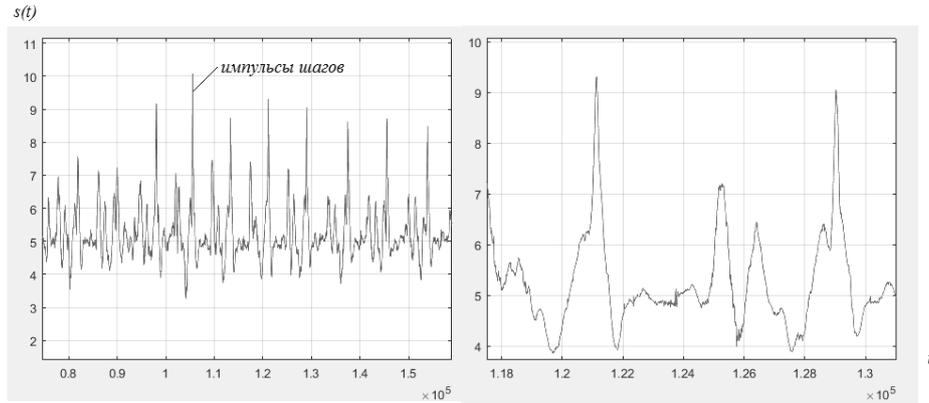
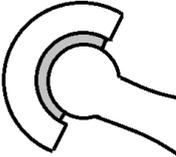
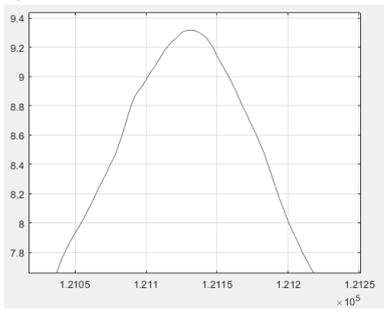
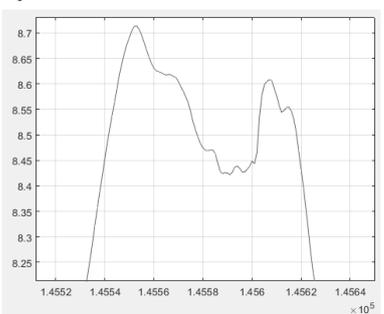


Рис. 5 – Квазипериодический сигнал

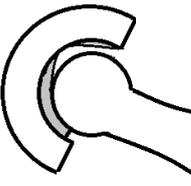
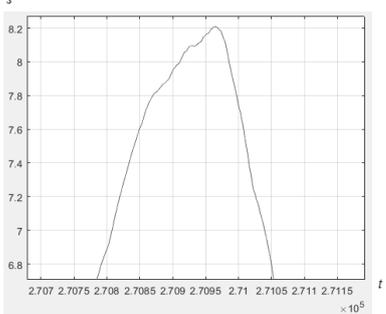
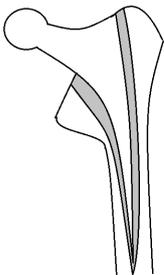
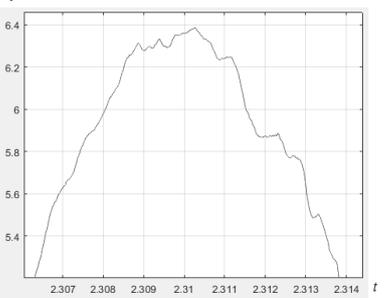
Fig. 5 – Quasiperiodic signal

Наибольший интерес для диагностики состояния эндопротеза представляют формы вершин импульсов шага. Описание типичных дефектов искусственного сустава и формы соответствующих им вершин импульсов приведены в таблице.

Типичные дефекты искусственного сустава
Typical defects of artificial joints

| № п/п | Состояние сустава | Схематическое изображение эндопротеза тазобедренного сустава | Форма вершины импульса шага пациента $s_p(t)$ |
|-------|---|---|--|
| 1 | Норма |  |  |
| 2 | Полное истирание полиэтиленового вкладыша |  |  |

Окончание таблицы
The End Table

| № п/п | Состояние сустава | Схематическое изображение эндопротеза тазобедренного сустава | Форма вершины импульса шага пациента $s_p(t)$ |
|-------|--|--|---|
| 3 | Частичное истирание полиэтиленового вкладыша |  |  |
| 4 | Расшатывание ножки в области крепления эндопротеза к бедренной кости |  |  |

Визуальный анализ экспериментальных данных позволил предположить возможность диагностики состояния эндопротеза тазобедренного сустава на основе исследования формы вершины импульса шага пациента. Обозначим $s_p[n]$ фрагмент сигнала, содержащий вершину импульса. При этом:

$$s_p[n] = s[n] \text{ при } n = n_b, \dots, n_e, \quad s_p[n] \geq s[n_b], \quad s_p[n] \geq s[n_e],$$

где n_b, n_e – номера отсчетов начала и конца импульса.

Будем также полагать, что $s_p[n_b] = s_p[n_e]$, т. е. сигнал $s_p[n]$ формируется из отсчетов сигнала $s[n]$, превысивших некоторый порог C_p . Этот порог может быть выбран динамически, на основе некоторого характерного значения сигнала $s[n]$ в определенном временном интервале (окне) наблюдения импульса. Таким характерным значением может быть, например, максимум s_{\max} сигнала $s[n]$ в заданном временном окне. Порог можно выбрать согласно выражению $C_p = \alpha s_{\max}$, где $\alpha \in (0, 1)$. Чем ближе α к единице, тем меньшая окрестность вершины импульса шага будет включена в сигнал $s_p[n]$.

В соответствии с таблицей неповрежденный эндопротез тазобедренного сустава характеризуется практически симметричной, одновершинной функцией $s_p[n]$

и сравнительно коротким интервалом $[n_b, n_e]$ при фиксированном значении α , т. е. склоны импульса шага достаточно крутые. При повреждениях эндопротеза наблюдается раздвоение вершины (двухмодовость), нарушение ее симметрии, а также расширение импульса во временной области. Необходимо предложить критерии, позволяющие на основе измерений сигнала $s_p[n]$ принять решение о наличии либо отсутствии дефектов эндопротеза, приведенных в таблице (с. 54). Для конструирования этих критериев, нечувствительных к абсолютным значениям уровня сигнала $s_p[n]$, сформируем на его основе весовую функцию $u_p[n]$:

$$u_p[n] = \frac{s_p[n]}{\sum_{n=n_b}^{n_e} s_p[n]}. \quad (2)$$

Приняв обозначение $N = n_e - n_b + 1$ для длительности импульса, можно записать:

$$u_p[k] = \frac{s_p[k + n_b]}{\sum_{k=0}^{N-1} s_p[k + n_b]}, \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (3)$$

В качестве статистики S_1 критерия принятия решения о раздвоении вершины импульса шага (двухмодовости) можно использовать следующую величину:

$$S_1 = \min_k \left(\frac{\sigma_0^2 + \sigma_1^2}{\sigma_u^2} \right), \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (4)$$

где

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=0}^k \frac{(i-m_0)^2 u_p[i]}{\sum_{i=0}^k u_p[i]}, \quad m_0 = \frac{\sum_{i=0}^k i u_p[i]}{\sum_{i=0}^k u_p[i]},$$

$$\sigma_1^2 = \frac{\sum_{i=k+1}^{N-1} \frac{(i-m_1)^2 u_p[i]}{\sum_{i=k+1}^{N-1} u_p[i]}, \quad m_1 = \frac{\sum_{i=k+1}^{N-1} i u_p[i]}{\sum_{i=k+1}^{N-1} u_p[i]}$$

и $\sigma_u^2 = (N-1)^2 / 12$.

Если рассматривать функцию $u_p[n]$ после соответствующей нормировки (3) как распределение вероятности, то величины σ_0^2 , σ_1^2 имеют смысл дисперсий для распределений

$$P_0(i) = \frac{u_p[i]}{\sum_{i=0}^k u_p[i]}, \quad i = 0, \dots, k,$$

$$P_0(i) = \frac{u_p[i]}{\sum_{i=k+1}^{N-1} u_p[i]}, \quad i = k, \dots, N-1$$

соответственно, величины m_0, m_1 аналогичны их математическим ожиданиям, а σ_u^2 – дисперсия равномерного распределения, заданного на множестве целых чисел $\{0, 1, \dots, N-1\}$. С учетом (4) критерий γ_1 двухмодовости вершины импульса шага можно представить в следующем виде:

$$\gamma_1(S_1) = \begin{cases} 1, & S_1 < C_1, \\ 0, & S_1 \geq C_1. \end{cases} \quad (5)$$

Порог принятия решения C_1 может выбираться, например, на основе статистического анализа большой группы классифицированных данных, полученных на основе сигналов как исправных, так и дефектных (по данному признаку двухмодовости) эндопротезов. В проводимых экспериментах было выбрано значение порога $C_1 = 0,5$. Таким образом, решение о двухмодовости вершины импульса принимается, когда $S_1 < C_1$, в противном случае считается, что импульс одномодовый. На рис. 6 приведены функции $s_p[n]$ трех пациентов с дефектом типа «полное истирание полиэтиленового вкладыша» и одного пациента с исправным эндопротезом.

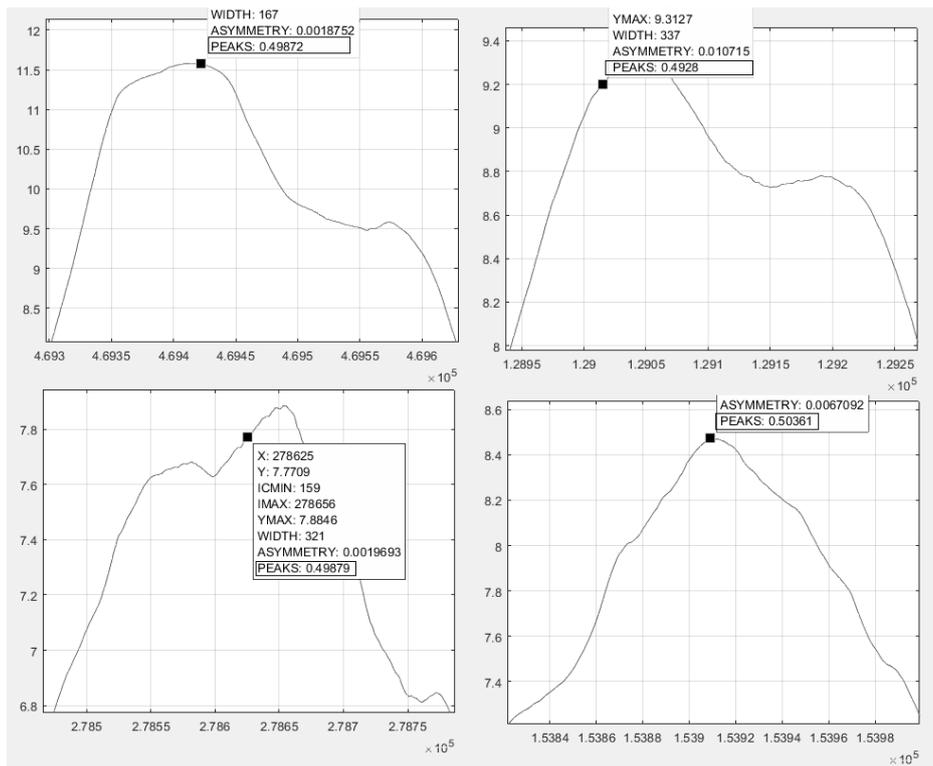


Рис. 6 – Вершины импульсов $s_p[n]$ при дефекте эндопротеза типа «полное истирание полиэтиленового вкладыша»
 Fig. 6 – Pulse peaks $s_p[n]$ for endoprosthesis defect of the “complete abrasion of the polyethylene liner” type

Решение о дефекте типа «частичное истирание полиэтиленового вкладыша» может приниматься на основе анализа симметрии вершины импульса $s_p[n]$, или (что то же самое) симметрии весовой функции $u_p[n]$. Для этого можно воспользоваться правилом, использующим в качестве решающей статистики величину S_2 , определяемую как

$$S_2 = |s_1 - s_2| = \left| \sum_{i=0}^{N/2-1} u_p[i] - \sum_{i=N/2}^{N-1} u_p[i] \right|. \quad (6)$$

Если функция $u_p[n]$ симметрична относительно середины интервала $[0, 1, \dots, N-1]$, то слагаемые s_1 и s_2 равны, и их разность равна нулю. Соответствующий критерий принятия решения о симметрии вершины импульса имеет вид

$$\gamma_2(S_2) = \begin{cases} 1, & S_2 > C_2, \\ 0, & S_2 \leq C_2. \end{cases} \quad (7)$$

Порог принятия решения C_2 также может выбираться на основе статистического анализа большой группы классифицированных данных. В проводимых экспериментах было выбрано значение порога $C_2 = 0,003$. На рис. 7 приведены функции $u_p[n]$ трех пациентов с дефектом типа «частичное истирание полиэтиленового вкладыша» и одного пациента с исправным эндопротезом.

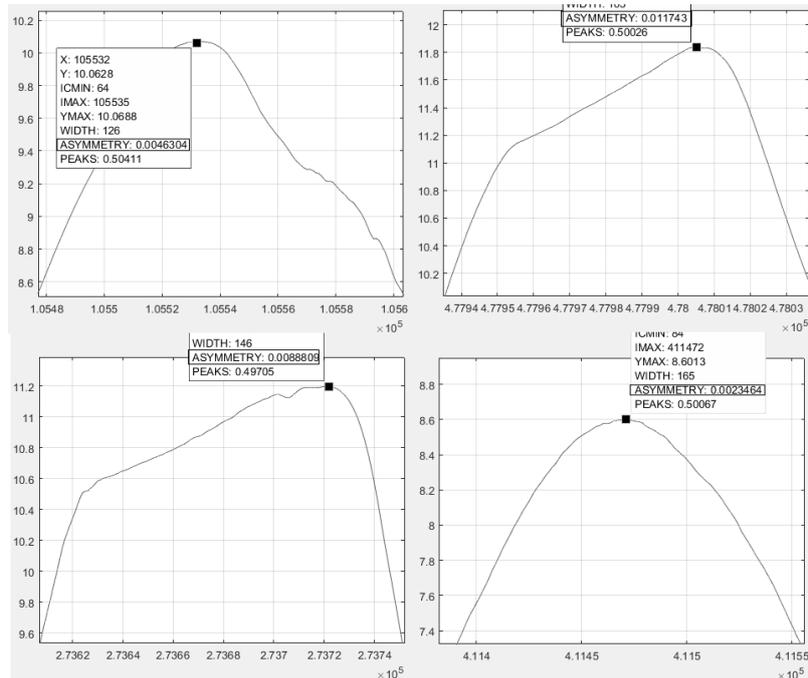


Рис. 7 – Вершины импульсов $s_p[n]$ при дефекте эндопротеза типа «частичное истирание полиэтиленового вкладыша»

Fig. 7 – Pulse peaks $s_p[n]$ for a defect in the endoprosthesis of the “partial abrasion of the polyethylene liner” type

Решение о расшатывании крепления эндопротеза может быть вынесено в результате измерения ширины вершины импульса (в отсчетах) на соответствующем уровне C_p . Иначе говоря, статистикой для принятия решения о наличии расшатывания служит длительность импульса, т. е. $S_3 = N$. Правило принятия решения о расшатывании может быть сформулировано в виде

$$\gamma_3(S_3) = \begin{cases} 1, & S_3 > C_3, \\ 0, & S_3 \leq C_3. \end{cases} \quad (8)$$

Выбор порога C_3 осуществляется аналогично порогам C_1 и C_2 на основе статистического анализа группы классифицированных данных. В проводимых экспериментах было выбрано значение порога $C_3 = 200$. На рис. 8 приведены функции $s_p[n]$ трех пациентов с дефектом типа «расшатывание» и одного пациента с исправным протезом.

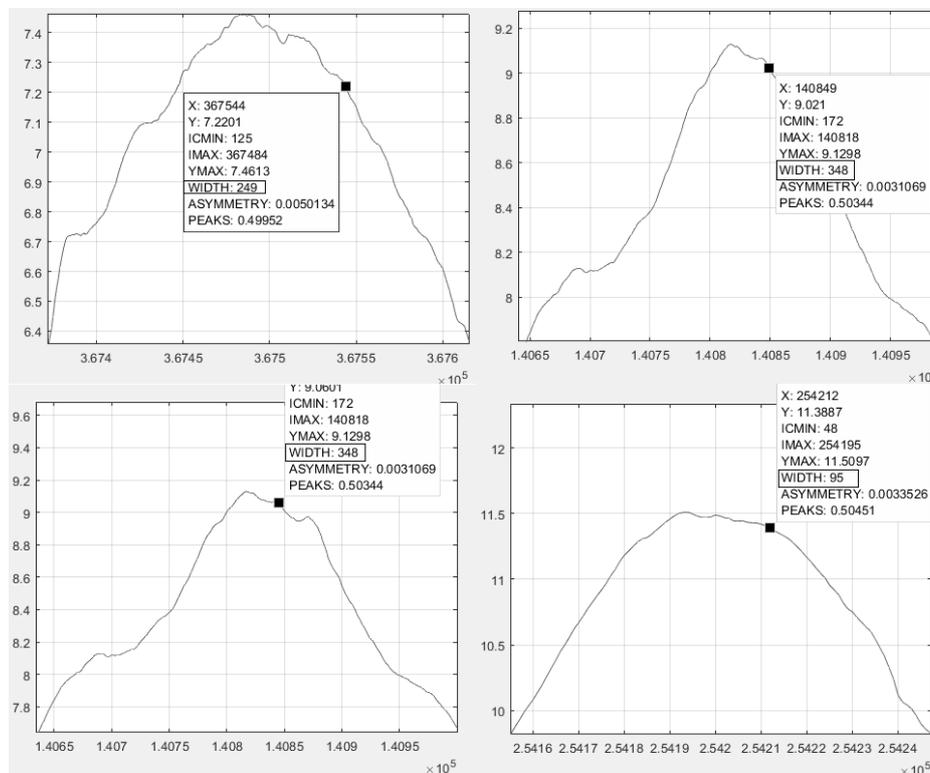


Рис. 8 – Вершины импульсов $s_p[n]$ при дефекте эндопротеза типа «расшатывание»

Fig. 8 – Pulse peaks $s_p[n]$ in the case of a defect in the endoprosthesis of the “loosening” type

Если в результате проверки всех трех гипотез (о «двухмодовости», асимметрии и расшатывании) в соответствии с правилами (5)–(8) соответствующие дефекты искусственного сустава не были выявлены, принимается решение о его исправности.

Заключение

Представленные в работе предварительные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности использования звуковых и вибрационных колебаний для диагностики *in vivo* состояния эндопротеза. Представляется целесообразным продолжение исследований, в том числе необходимо накопление базы данных, включающей записи колебаний, полученных от пациентов с исправными и дефектными эндопротезами.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Шум керамики» как нежелательное явление в эндопротезировании тазобедренного сустава / Б.П. Таштанов, И.А. Кирилова, Д.В. Павлова, В.В. Павлов // Гений ортопедии. – 2023. – Т. 29 (5). – С. 565–573. – DOI: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-565-573. – EDN: ALTWQW.
2. Hip squeaking after ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty / G.L. Wu, W. Zhu, Y. Zhao, Q. Ma, X.S. Weng // Chinese Medical Journal. – 2016. – Vol. 129 (15). – P. 1861–1866.
3. Lancaster-Jones O.O., Reddiough R. The occurrence of squeaking under wear testing standards for ceramic on ceramic total hip replacements // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2023. – Vol. 138. – P. 105616. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105616.
4. Incidental discovery of an undisplaced ceramic liner fracture at total hip arthroplasty revision for squeaking / C. Dacheux, D. Bocquet, H. Migaud, J. Girard // Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research. – 2013. – Vol. 99 (5). – P. 631–634. – DOI: 10.1016/j.otsr.2013.05.001.
5. Squeaking sound in total hip arthroplasty using ceramic-on-ceramic bearing surfaces / S.-C. Ki, B.-H. Kim, J.-H. Ryu, D.-H. Yoon, Y.-Y. Chung // Journal of Orthopaedic Science. – 2011. – Vol. 16 (1). – P. 21–25. – DOI: 10.1007/s00776-010-0005-3.
6. Раскол керамического вкладыша эндопротеза тазобедренного сустава: клинический случай / Б.П. Таштанов, А.А. Корыткин, В.В. Павлов, И.И. Шубняков // Травматология и ортопедия России. – 2022. – Т. 28 (3). – С. 63–73. – DOI: 10.17816/2311-2905-1804.
7. Hosseini S., Claramunt R., Ros A. Non-invasive technologies for diagnostics of orthopaedic implant fixation // Medical Devices & Sensors. – 2020. – Vol. 3 (6). – P. e10125. – DOI: 10.1002/mds3.10125.
8. Squeaking in ceramic-on-ceramic hips: the importance of acetabular component orientation / W.L. Walter, W.K. Walter, F. Ellis, B. Zicat // The Journal of Arthroplasty. – 2007. – Vol. 22 (4). – P. 496–503. – DOI: 10.1016/j.arth.2006.06.018.
9. Is *in vivo* sensing in a total hip replacement a possibility? A review on past systems and future challenges / O.G. Vickers, P.R. Culmer, G.H. Isaac, R.W. Kay, M.P. Shuttleworth, T. Board, S. Williams // Progress in Biomedical Engineering. – 2021. – Vol. 3 (4). – P. 042004. – DOI: 10.1088/2516-1091/ac1b7f.

PROCESSING AND ANALYSIS OF SIGNALS FOR DIAGNOSING THE CONDITION OF A HIP JOINT ENDOPROSTHESIS

Vasyukov V.N.¹, Rajfeld M.A.¹, Sokolova D.O.¹,
Tashtanov B.R.², Pavlov V.V.²

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics
named after Ya.L. Tsivyan, Novosibirsk, Russia*

One of the problems associated with hip arthroplasty is that the endoprosthesis is subjected to significant mechanical loads, which can lead to its destruction. Revision surgeries aimed at determining the condition of the prosthesis are complex and expensive, in addition, they are asso-

ciated with the need for the patient to arrive at a medical facility and be hospitalized. An approach to diagnosing a hip endoprosthesis during the patient's normal life is proposed, based on the analysis of vibration and sound oscillations taken from the body surface using a device developed for this purpose based on a three-axis accelerometer. The device for recording vibration and sound oscillations has small dimensions and weight, is fixed on the ilium and practically does not limit the patient's movements during signal recording. The signals are recorded in digital form on a memory card, which, after measurements are taken, can be removed from the device and used to transfer the recording to a computer for processing and analysis. Analysis of the records of signals obtained experimentally allowed to identify signs of various defects (partial abrasion of the polyethylene liner, complete abrasion of the liner and loosening of the prosthesis stem in the area of its attachment to the femur). Statistics are proposed for making a decision when testing hypotheses about the presence/absence of these defects. The results of the experiments are presented.

Keywords: endoprosthesis, hip joint, diagnostics, accelerometer.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-48-63

REFERENCES

1. Tashtanov B.R., Kirilova I.A., Pavlova D.V., Pavlov V.V. «Shum keramiki» kak nezhelatel'noe yavlenie v endoprotezirovanii tazobedrennogo sustava [Ceramic-related noise as an adverse outcome in total hip arthroplasty]. *Genij ortopedii*, 2023, vol. 29 (5), pp. 565–573. DOI: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-565-573.
2. Wu G.L., Zhu W., Zhao Y., Ma Q., Weng X.S. Hip squeaking after ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *Chinese Medical Journal*, 2016, vol. 129 (15), pp. 1861–1866.
3. Lancaster-Jones O.O., Reddiough R. The occurrence of squeaking under wear testing standards for ceramic on ceramic total hip replacements. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, vol. 138, p. 105616. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105616.
4. Dacheux C., Bocquet D., Migaud H., Girard J. Incidental discovery of an undisplaced ceramic liner fracture at total hip arthroplasty revision for squeaking. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 2013, vol. 99 (5), pp. 631–634. DOI: 10.1016/j.otsr.2013.05.001.
5. Ki S.-C., Kim B.-H., Ryu J.-H., Yoon D.-H., Chung Y.-Y. Squeaking sound in total hip arthroplasty using ceramic-on-ceramic bearing surfaces. *Journal of Orthopaedic Science*, 2011, vol. 16 (1), pp. 21–25. DOI: 10.1007/s00776-010-0005-3.
6. Tashtanov B.R., Korytkin A.A., Pavlov V.V., Shubnyakov I.I. Raskol keramicheskogo vkladysya endoproteza tazobedrennogo sustava: klinicheskii sluchai [Ceramic liner fracture in total hip arthroplasty: a case report]. *Travmatologiya i ortopediya Rossii = Traumatology and Orthopedics of Russia*, 2022, vol. 28 (3), pp. 63–73. DOI: 10.17816/2311-2905-1804.
7. Hosseini S., Claramunt R., Ros A. Non-invasive technologies for diagnostics of orthopaedic implant fixation. *Medical Devices & Sensors*, 2020, vol. 3 (6), p. e10125. DOI: 10.1002/mds3.10125.
8. Walter W.L., Walter W.K., Ellis F., Zicat B. Squeaking in ceramic-on-ceramic hips: the importance of acetabular component orientation. *The Journal of Arthroplasty*, 2007, vol. 22 (4), pp. 496–503. DOI: 10.1016/j.arth.2006.06.018.
9. Vickers O.G., Culmer P.R., Isaac G.H., Kay R.W., Shuttleworth M.P. Board T., Williams S. Is *in vivo* sensing in a total hip replacement a possibility? A review on past systems and future challenges. *Progress in Biomedical Engineering*, 2021, vol. 3 (4), p. 042004. DOI: 10.1088/2516-1091/ac1b7f.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Васюков Василий Николаевич – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: цифровая обработка и статистический анализ сигналов и изображений. Опубликовано более 140 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vasyukov@corp.nstu.ru).

Vasyukov Vasily Nikolaevich (b. 1951) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor of Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on digital signal and image processing and statistical analysis. He is the author of over 140 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vasyukov@corp.nstu.ru).



Райфельд Михаил Анатольевич – родился в 1965 году, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: локационные, навигационные и инфокоммуникационные технологии, цифровые статистические методы обработки сигналов и изображений. Опубликовано около 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: rajfeld@corp.nstu.ru).

Rajfeld Mikhail Anatol'evich (b. 1965) – Doctor of Sciences (Eng.), Associate professor, head of the department of radio engineering fundamentals in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on location, navigation, and information communication technologies, digital statistical methods of signal and image processing. He is the author of about 100 scientific papers (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: rajfeld@corp.nstu.ru).



Соколова Дарья Олеговна – родилась в 1984 году, канд. техн. наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов. Опубликовано 48 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: d.sokolova@corp.nstu.ru).

Sokolova Darya Olegovna (b. 1984) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of radio engineering in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on statistical signal processing. She is the author of 48 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.sokolova@corp.nstu.ru).



Таштанов Байкожо Рустамович – родился в 1997 году, аспирант научно-исследовательского отделения эндопротезирования и эндоскопической хирургии суставов Новосибирского научно-исследовательского института травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна. Область научных интересов: эндопротезирование крупных суставов. Опубликовано три научные работы. (Адрес: 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Фрунзе, 17. E-mail: b.tashtanov95@gmail.com).

Tashtanov Baikozho Rustamovich (b. 1997) – postgraduate student of the research department of endoprosthesis and endoscopic surgery of joints of the Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after Ya.L. Tsivyan. Research interests: endoprosthesis of large joints. Published 3 scientific papers. (Address: 17, Frunze st., Novosibirsk, 630091, Russia. E-mail: b.tashtanov95@gmail.com).



Павлов Виталий Викторович – родился в 1963, д-р мед. наук, доцент, начальник научно-исследовательского отделения эндопротезирования и эндоскопической хирургии суставов Новосибирского научно-исследовательского Института травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна. Область научных интересов: хирургия крупных суставов. Опубликовано 238 научных работ. (Адрес: 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Фрунзе, 17. E-mail: pavlovdoc@mail.ru).

Pavlov Vitaly Viktorovich (b. 1963) – Doctor of Sciences (Med.), Associate Professor, Head of the Research Department of Endoprosthetics and Endoscopic Surgery of Joints of the Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after Ya.L. Tsivyan. Research interests: surgery of large joints. Published 238 scientific papers. (Address: 17, Frunze St., Novosibirsk, 630091, Russia. E-mail: pavlovdoc@mail.ru).

*Статья поступила 17 ноября 2024 г.
Received November 17, 2024*

To Reference:

Vasyukov V.N., Raifeld M.A., Sokolova D.O., Tashtanov B.R., Pavlov V.V. Obrabotka i analiz signalov dlya diagnostiki sostoyaniya endoproteza tazobedrennogo sustava [Processing and analysis of signals for diagnosing the condition of a hip joint endoprosthesis]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 48–63. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-48-63.

УДК 621.396.9

**УСТРАНЕНИЕ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ОЦЕНОК НАПРАВЛЕНИЙ
ПРИХОДА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В МНОГОСИГНАЛЬНОМ
РЕЖИМЕ ПЕЛЕНГОВАНИЯ****М.Е. Шевченко¹, В.Н. Малышев¹,
С.С. Соколов¹, А.В. Осетров¹, А.С. Черепанов²**¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ»*²*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**

При пеленговании перекрывающихся по спектру источников широкополосного сигнала в спектральной области при фиксированной конфигурации антенной решетки требуется устранение неоднозначности амплитудно-фазовых распределений и разностей фаз, соответствующих различным спектральным отсчетам. Составляющим спектра одного и того же сигнала соответствуют неодинаковые значения расстояния в длинах волн между элементами антенной решетки, приводящие к неоднозначности оценок в высокочастотной части спектра. В работе предложен метод устранения неоднозначности, совместимый с многосигнальным режимом пеленгования на основе методов подпространств: MUSIC и ESPRIT. Устранение неоднозначности проведено коррекцией разностей фаз между антеннами для каждого спектрального отсчета с учетом предварительного соотнесения неоднозначных амплитудно-фазовых распределений в многосигнальном режиме к однозначным, полученным для низкочастотной области спектра, по максимуму корреляции. Корректное амплитудно-фазовое распределение для каждого спектрального отсчета восстанавливается из скорректированных разностей фаз между антеннами и используется в корреляционных алгоритмах пеленгования. Представлены результаты имитационного моделирования по пеленгованию пяти источников звукового широкополосного сигнала с помощью квадратной шестнадцатизначной антенной решетки с внутренним заполнением, полученные на основе предложенного метода устранения неоднозначности в многосигнальном режиме по ESPRIT.

Ключевые слова: широкополосный сигнал, точечное пеленгование в спектральной области, устранение неоднозначности оценок азимута и угла места, антенная решетка, многосигнальный режим пеленгования, MUSIC, ESPRIT.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-64-73

Введение

При пеленговании широкополосных сигналов с помощью M -элементной антенной решетки (АР) при нарушении классического условия узкополосности,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Мультимодальный комплекс контроля воздушного пространства аэропорта» (Соглашение о предоставлении субсидии федерального бюджета на развитие кооперации государственного научного учреждения и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2023-007 от 10.02.2023) и в рамках Постановления Правительства РФ от 09 апреля 2010 г. № 218. Работа выполнена на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

из-за изменения $\Delta'(f) = \Delta/\lambda = \Delta f/c$ – расстояния в длинах волн между соседними антеннами, разнесенными на Δ , недопустимо формировать оценку направлений прихода сигнала целиком по всему спектру, поскольку проявляется неоднозначность амплитудно-фазовых распределений (АФР) разных спектральных составляющих.

Изменение расстояний в длинах волн для максимальной f_{\max} и минимальной f_{\min} частот $\Delta'(f_{\max})/\Delta'(f_{\min}) > 1$ может быть существенным. Для узкополосного радиосигнала $\Delta'(f_{\max})/\Delta'(f_{\min}) \approx 1$. Точечное пеленгование в каждом спектральном отсчете (СО) позволяет избежать влияния зависимости $\Delta'(f)$, $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$ на формирование оценок азимута θ и угла места β . При $\Delta'(f) < 0,5$ АФР отсчетов – однозначное и формируются однозначные оценки в низкочастотной части спектра, но точность оценок при $\Delta'(f) < 0,3$ может быть низкой и недостаточной, а при $\Delta'(f) > 0,5$ появляется неоднозначность оценок, требующая устранения. Спектральные отсчеты, для которых $\Delta'(f) < 0,5$, называются далее однозначными СО, соответственно СО, у которых $\Delta'(f) > 0,5$, – неоднозначными.

Для решения этой задачи предложено использовать виртуальные АР, образовывать подрешетки из имеющейся АР, для которых расстояние в определенном диапазоне частот позволяет сформировать однозначные оценки, преобразовывать данные произвольного СО на однозначный СО с помощью фокусирующих матриц [1–6]. Однако проблема состоит в поиске этих матриц в условиях априорной неопределенности.

В высокочастотных СО точность формируемых с устранением неоднозначности оценок возрастает по сравнению с точностью оценок для однозначных СО.

В односигнальном режиме неоднозначность устраняется просто, поскольку все выносимые оценки в разных СО соответствуют только одному ИРИ.

Для многосигнального режима, предполагающего наличие нескольких перекрывающихся по спектру сигналов, для всех неоднозначных СО требуется предварительное установление соответствия вынесенных оценок нескольких источников оценкам в однозначных СО. Решение этой задачи рассмотрено далее.

1. Точечное пеленгование

Термин *точечное пеленгование* [7] означает формирование оценок азимута θ и угла места β для каждого n -го СО наблюдаемых данных от M антенн. n -й отсчет соответствует частоте $f_n = f_{\min} + (n-1)(f_{\max} - f_{\min})/N$, $n = \overline{1, N}$, N – число СО.

Исходными данными для многосигнального режима при точечном пеленговании является матрица из n -х СО, сформированных по $K > M$ наблюдениям:

$$Z_n = \begin{bmatrix} \frac{(y_{1n})_1}{(\hat{\delta}_1)_1} & \dots & \frac{(y_{1n})_K}{(\hat{\delta}_1)_K} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{(y_{mn})_1}{(\hat{\delta}_m)_1} & \dots & \frac{(y_{mn})_K}{(\hat{\delta}_m)_K} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{(y_{Mn})_1}{(\hat{\delta}_M)_1} & \dots & \frac{(y_{Mn})_K}{(\hat{\delta}_M)_K} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\hat{\delta}_m$ – оценка уровня шума в m -канале приема, $m = \overline{1, M}$.

Каждый СО $y_{mn} = \sum_{i=1}^{d_n} b_i S_n^i a_{mn}(\theta_i, \beta_i) + \zeta_{mn}$, $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, где d_n – число сигнальных составляющих от разных ИРИ в n -м отсчете; b_i – энергетический параметр сигнала; S_n^i – отсчет спектра i -го сигнала; $a_{mn}(\theta_i, \beta_i)$ – отклик m -й антенны на направление прихода i -го сигнала θ_i, β_i для n -го отсчета. Много-сигнальный режим основан на разложении матрицы $R_Z = E \text{diag}(\Lambda) E^H$ по собственным векторам $E = [E_1 \dots E_M]$, $E_m = [E_{1m} \dots E_{mM}]^T$, $m = \overline{1, M}$, и числам $\Lambda = [\lambda_1 \dots \lambda_M]$, $\lambda_1 > \dots > \lambda_M$.

Число собственных чисел (СЧ), превысивших установленный по шумовым СЧ порог, соответствует числу сигналов, присутствующих в СО \hat{d}_n .

Формирование оценок $\hat{\theta}_{ni}$, $i = \overline{1, \hat{d}_n}$, в зависимости от оцененного числа сигналов и конфигурации АР проводится на основе методов MUSIC или ESPRIT [8].

2. Устранение неоднозначности

В многосигнальном режиме при наличии нескольких сигналов требуется установить взаимное соответствие фактических АФР АР $\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i) = \hat{a}_{mn}(\theta_i, \beta_i) \times \hat{a}_{1n}^*(\theta_i, \beta_i)$, $m = \overline{2, M}$, $n = \overline{1, N}$, разных СО каждого сигнала.

При ESPRIT фактическое АФР \hat{g}_{mn} определяется СЧ оператора поворота, при MUSIC как ожидаемое АФР, определяющее сигнальное подпространство, ортогональное шумовому подпространству, т. е. при котором достигаются максимумы пеленгационной характеристики меры MUSIC.

Ожидаемое АФР $a_{mn}(\theta, \beta)$, $m = \overline{1, M}$, $\theta \in [0 \dots 360^\circ]$, $\beta \in [0 \dots 90^\circ]$, определяется конфигурацией АР, зависит от частоты (номера СО) и направлений прихода сигнала θ, β и может быть задано аналитически, рассчитано с помощью электродинамического моделирования, оценено калибровкой.

Для однозначных СО ($\Delta'_n = \Delta'(f_n) < 0,5$) вычисляются оценки $\hat{\theta}_{ni}, \hat{\beta}_{ni}$, $i = \overline{1, \hat{d}_n}$, и вычисляются усредненные оценки $\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i$ по однозначным СО для повышения точности при расчете ожидаемого распределения для любого СО: $g_{mn}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) = a_{mn}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) a_{1n}^*(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)$. Соответствие устанавливается максимумом корреляции $\max(\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i) g_{mn}^*(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i))$ между $\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i)$ и $g_{mn}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)$.

Устранение неоднозначности для СО при $\Delta'(f) \geq 0,5$ проводится аналогично устранению неоднозначности в многобазисных линейных АР [9]:

$$\arg(\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i)) = \arg(\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i)) + 2\pi \left[\frac{\arg(g_{mn_0}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)) \frac{\Delta'_n}{\Delta'_{n_0}} - \arg(\hat{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i))}{2\pi} \right], \quad (2)$$

где $g_{mn_0}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) = a_{mn_0}(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i) a_{1n_0}^*(\bar{\theta}_i, \bar{\beta}_i)$ – эталонное распределение для выбранного однозначного СО n_0 , $[\]$ – ближайшее целое. Скорректированное АФР $\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i) = \exp[j \arg(\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i))]$.

Однозначные оценки $\tilde{\theta}_{ni}$ вычисляются с учетом конфигурации АР подстановкой вычисленного по (2) $\arg(\tilde{g}_{mn}(\theta_i, \beta_i))$ в соответствующее выражение, или поиском максимума корреляции скорректированного АФР с ожидаемым $\hat{\theta}_i, \hat{\beta}_i = \max_{\theta \in [0...360^\circ], \beta \in [0...90^\circ]} (\arg(\tilde{g}_n(\theta_i, \beta_i)) \mathbf{g}_n^H(\theta_i, \beta_i))$.

3. Иллюстрация точечного пеленгования широкополосного сигнала с устранением неоднозначности

Пример применения точечного пеленгования **звуковых** сигналов (скорость звука в воздухе 330 м/с) в диапазоне 500...2000 Гц квадратной 16-элементной АР (рис. 1) с внутренним заполнением, подходящей для реализации многосигнального режима на основе ESPRIT. Расстояние между соседними микрофонами АР $\Delta = 16,7$ см. Изменение расстояния между элементами АР в длинах волн в зависимости от частоты изображено на рис. 2, а. Были имитированы пять источников, излучающих случайный широкополосный сигнал с направлениями прихода $(10^\circ, 20^\circ)$, $(45^\circ, 15^\circ)$, $(79^\circ, 19^\circ)$, $(120^\circ, 17^\circ)$, $(260^\circ, 13^\circ)$. Амплитудный спектр одного сигнала приведен на рис. 2, б.

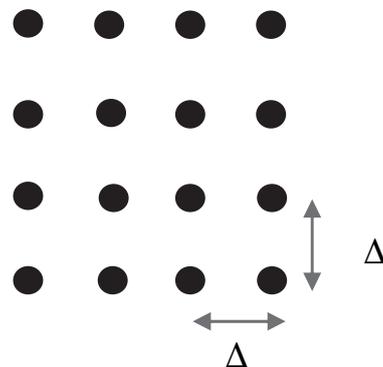
Оценки азимута для СО, соответствующие частотам до 900 Гц, являются однозначными при $f > 900$ Гц, расстояние в длинах $\Delta'(f > 900 \text{ Гц}) > 0,5$ и появляется требующая устранения неоднозначность оценок (рис. 2, в).

После взаимного сопоставления оценок фазовых сдвигов между антеннами и устранения неоднозначности в многосигнальном режиме получены оценки, приведенные на рис. 2, г.

Как видно из рис. 2, в, точность оценок в высокочастотной области спектра $\Delta'(f > 900 \text{ Гц}) > 0,5$ выше, чем в низкочастотной области, в которой обеспечивается однозначность из-за выполнения условия $\Delta' < 0,5$.

Рис. 1 – Конфигурация АР с внутренним заполнением

Fig. 1 – Configuration of the antenna array with internal filling



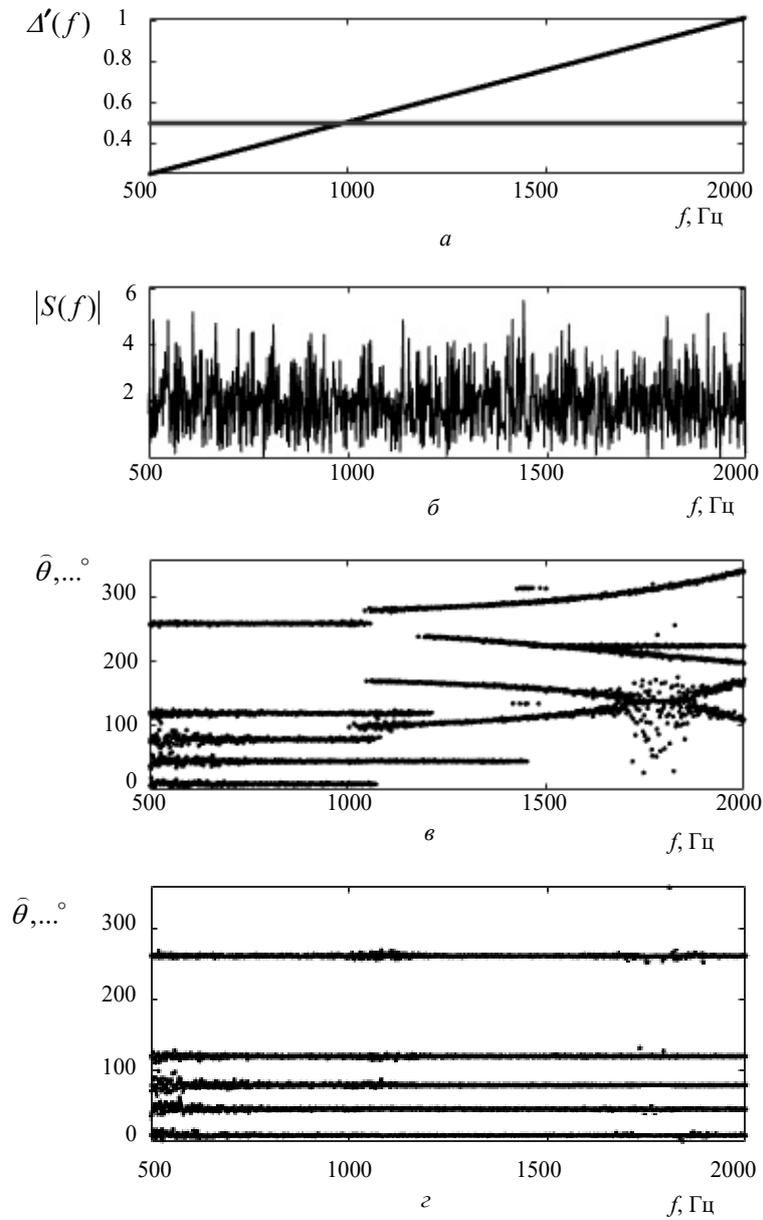


Рис. 2 – Точечное пеленгование широкополосных источников звука Δ' по ESPRIT:

a – изменение Δ' в полосе частот, занимаемых широкополосным источником звука; b – амплитудный спектр пеленгуемого сигнала; c – оценки азимута без устранения неоднозначности фаз; d – оценки азимута с устранением неоднозначности фаз

Fig. 2 – Direction finding of wideband sound sources in spectral counts with ESPRIT

a – Δ' variation in a wideband sound source band; b – amplitude spectrum of a single signal; c – azimuth estimates without correction of phase ambiguity; d – azimuth estimates with correction of phase ambiguity

Приведенный пример показывает, что устранение неоднозначности пеленгования высокочастотных составляющих спектра на основе использования однозначных оценок направлений прихода низкочастотных составляющими обеспечивает более высокую точность пеленгования источников широкополосного сигнала.

4. Интервальное пеленгование

Недостатком точечного пеленгования являются большие вычислительные затраты. Для их снижения диапазон СО можно разбить на интервалы для которых сохраняется примерно одинаковое расстояние в длинах волн $\frac{\Delta'_{n_2}}{\Delta'_{n_1}} \approx 1$. Если $n_2 - n_1 + 1 > M$, то можно применить интервальное пеленгование [7], для которого формируется матрица из всех СО интервала $[n_1 \dots n_2]$:

$$(Z_{n_1 \dots n_2})_k = \begin{bmatrix} \frac{y_{1n_1}}{(\delta_1)_k} & \dots & \frac{y_{1n_2}}{(\delta_1)_k} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{y_{Mn_1}}{(\delta_M)_k} & \dots & \frac{y_{Mn_2}}{(\delta_M)_k} \end{bmatrix}, \quad k = 1 \dots K.$$

Интервальное пеленгование можно реализовать без накопления $(R_Z)_k = (Z_{n_1 \dots n_2})_k (Z_{n_1 \dots n_2})_k^H$, т. е. по данным, полученным при однократном наблюдении, и с накоплением $R_Z = \sum_{k=1}^K (R_Z)_k$ для повышения точности оценивания УК ИРИ. Далее выполняются такие же действия с матрицей R_Z , как при точечном пеленговании.

Заключение

Разработанный метод пеленгования широкополосных сигналов, не удовлетворяющих классическому условию узкополосности, за счет устранения неоднозначности АФР, создаваемых разными спектральными составляющими в АР, и соотношением оценок неоднозначных амплитудно-фазовых распределений с однозначными в низкочастотной области спектра, позволяет сформировать оценки направлений прихода, перекрывающиеся по спектру сигналов разных источников без существенных преобразований с наблюдаемыми данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Doron M.A., Nevet A.** Robust wavefield interpolation for adaptive wideband beamforming // Signal Processing. – 2008. – Vol. 88 (6). – P. 1579–1594.
2. **Friedlander B., Weiss A.J.** Direction finding for wide-band signals using an interpolated array // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1993. – Vol. 41 (4). – P. 1618–1634.
3. **Ottersten B., Kailath T.** Direction-of-arrival estimation for wide-band signals using the ESPRIT algorithm // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1990. – Vol. 38 (2). – P. 317–327. – DOI: 10.1109/29.103067.
4. **Mathai G., Jakobsson A., Gustafsson F.** Direction of arrival estimation of unknown number of wideband signals in unattended ground sensor networks // Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. – Istanbul, Turkey, 2013. – P. 685–690.

5. Direction of arrival estimation of wideband sources using sparse linear arrays / F. Wang, Z. Tian, G. Leus, J. Fang // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2021. – Vol. 69. – P. 4444–4457.
6. **Nawab S., Dowla F., Lacoss R.** Direction determination of wideband signals // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1985. – Vol. 33 (5). – P. 1114–1122. – DOI: 10.1109/TASSP.1985.1164705.
7. Интервальное и точечное пеленгование источников радиоизлучения при широкополосном радиомониторинге / М.Е. Шевченко, В.Н. Малышев, С.С. Соколов, А.В. Горовой, С.Н. Соловьев, Н.С. Стенюков // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. – 2020. – Т. 23 (6). – С. 28–42. – DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42.
8. **Roy R., Kailath T.** ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1989. – Vol. 37 (7). – P. 984–995. – DOI: 10.1109/29.32276.
9. **Денисов В.П., Дубинин Д.В.** Фазовые радиопеленгаторы. – Томск: Изд-во Том. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251 с.

ELIMINATION OF AMBIGUITY IN ESTIMATES OF THE ARRIVAL DIRECTIONS OF BROADBAND SIGNALS IN MULTISIGNAL BEARING MODE

**Shevchenko M.E.¹, Malyshev V.N.¹, Sokolov S.S.¹,
Osetrov A.V.¹, Cherepanov A.S.²**

¹*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint Petersburg, Russia*

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia*

Direction finding of wideband signals overlapping in the spectral domain by a fixed antenna array requires the correction of steering vector ambiguity and phase differences corresponding to different spectral components. The spectral components of the same signal correspond to unequal values of the distance in wavelengths between the antennas in the array. A method of steering vector ambiguity correction suitable for subspace methods such as MUSIC and ESPRIT is proposed. The ambiguity in the presence of multiple signals is resolved by correcting phase differences between antennas for each spectral component, with preliminary correlation of the ambiguous steering vector with unambiguous ones obtained for the low-frequency range of the spectrum using maximum correlation. The corrected steering vector for each spectral component is obtained from the adjusted phase differences between the antennas and is used in the direction finding correlation algorithm to obtain unambiguous estimates of the directions of arrival of the wideband signals. Simulation results for direction finding of five sound wideband signals using a square internally filled antenna array consisting of 16 antennas, based on ESPRIT with the proposed method of ambiguity correction, are presented. The proposed method for correcting the steering vector ambiguity caused by different spectral components of wideband signals in the antenna array allows estimation of their directions of arrival, as is done for narrowband radio signals.

Keywords: wideband signal, direction finding in the spectral domain, steering vector ambiguity, correction of azimuth and elevation estimate ambiguity, antenna array, MUSIC, ESPRIT.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-64-73

REFERENCES

1. Doron M.A., Nevet A. Robust wavefield interpolation for adaptive wideband beamforming. *Signal Processing*, 2008, vol. 88 (6), pp. 1579–1594.

2. Friedlander B., Weiss A.J. Direction finding for wide-band signals using an interpolated array. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, vol. 41 (4), pp. 1618–1634.
3. Ottersten B., Kailath T. Direction-of-arrival estimation for wide-band signals using the ESPRIT algorithm. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, vol. 38 (2), pp. 317–327. DOI: 10.1109/29.103067.
4. Mathai G., Jakobsson A., Gustafsson F. Direction of arrival estimation of unknown number of wideband signals in unattended ground sensor networks. *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, Istanbul, Turkey, 2013, pp. 685–690.
5. Wang F., Tian Z., Leus G., Fang J. Direction of arrival estimation of wideband sources using sparse linear arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, vol. 69, pp. 4444–4457.
6. Nawab S., Dowla F., Lacoss R. Direction determination of wideband signals. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1985, vol. 33 (5), pp. 1114–1122. DOI: 10.1109/TASSP.1985.1164705.
7. Shevchenko M.E., Malyshev V.N., Sokolov S.S., Gorovoy A.V., Soloviev S.N., Stenukov N.S. Interval'noe i tochechnoe pelengovanie istochnikov radioizlucheniya pri shirokopolosnom radiomonitoringe [Interval and point direction finding of radio emission sources for broadband radio monitoring]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, vol. 23 (6), pp. 28–42. DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42.
8. Roy R., Kailath T. ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, vol. 37 (7), pp. 984–995. DOI: 10.1109/29.32276.
9. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatory* [Phase direction finders]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2002. 251 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Шевченко Майя Евгеньевна – родилась в 1968 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных средств, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ». Область научных интересов: прием и обработка радиосигналов; обнаружение, различение и пеленгование сигналов, радиомониторинг; цифровая обработка сигналов. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, 5. E-mail: meshevchenko@etu.ru)

Shevchenko Majja Evgen'evna (b. 1968) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor department, organization. Her research interests are currently focused on radio signal reception and processing; signal detection, discrimination and direction finding, radio monitoring; digital signal processing. She is author of more than 80 scientific papers. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg 197376, Russia. E-mail: meshevchenko@etu.ru).



Малышев Виктор Николаевич – родился в 1956 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: численные методы, СВЧ-техника, антенны, информационные сети, информационная безопасность. Опубликовано более 120 научных работ. (Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, д. 5. E-mail: vnmalyshev@etu.ru).

Malyshev Victor Nikolaevich (b. 1956) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Chief of the Department of Radio Electronics Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". His research interests are currently focused on numerical methods; microwave engineering; antennas; information networks; information security. He is author of more than 120 scientific papers. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg, 197376, Russia. E-mail: vnmalyshev@etu.ru).



Соколов Сергей Сергеевич – родился в 1941 году, д-р техн. наук, профессор, профессор, кафедра микрорадиоэлектроники и технологии производства радиоаппаратуры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ». Область научных интересов: регистрация случайных процессов с двойной стохастичностью, адаптивные методы оценивания параметров сигналов, методы системной инженерии. Опубликовано 92 научные работы. (Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, 5. E-mail: sssokolov@etu.ru).

Sokolov Sergey Sergeevich – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Professor of the Department of Microradioelectronics and radio equipment technology V. I. Ulyanov (Lenin) Saint Petersburg state electrotechnical University "LETI". The author of 92 scientific publications. Area of expertise: registration of processes with double stochasticity, adaptive methods for estimating signal parameters, system engineering. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg, 197376, Russia, E-mail: sssokolov@etu.ru).



Осетров Александр Владимирович – родился в 1962 году, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Алгоритмическая математика», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: акустическая томография, акустоэлектроника, акустические поля, обработка сигналов и изображений. Опубликовано 118 научных работ. (Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, дом 5. E-mail: info@etu.ru).

Osetrov Alexander Vladimirovich (b. 1962) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor, Department of Algorithmic Mathematics, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". His research interests are currently focused on acoustic tomography, acoustoelectronics, acoustical fields, signal and image processing. He is the author of 118 scientific papers. (Address: 5, Professor Popov St., St. Petersburg, 197022, Russia. E-mail: info@etu.ru).



Черепанов Андрей Сергеевич – родился в 1952 году, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Область научных интересов: волноведущие структуры с ферритовым управлением, СВЧ-техника, фазированные антенные решетки. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, E-mail: ascherspb@mail.ru).

Cherepanov Andrey Sergeevich (b. 1952) – Doctor of Sciences (Phys.&Math.), appointment, Professor of the Graduate School of Applied Physics and Space Technology Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. His research interests are currently focused on ferrite-driven waveguide structures, microwave engineering, phased antenna arrays. He is author of 100 scientific papers. (Address: 29, Polytechnicheskaja St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ascherspb@mail.ru).

*Статья поступила 16 декабря 2024 г.
Received December 16, 2024*

To Reference:

Shevchenko M.E., Malyshev V.N., Sokolov S.S., Osetrov A.V., Cherepanov A.S. Ustranenie neodnoznachnosti otsenok napravlenii prikhoda shirokopolosnykh signalov v mnogosignal'nom rezhime pelengovaniya [Elimination of ambiguity in estimates of the arrival directions of broadband signals in multisignal bearing mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 64–73. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-64-73.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 4 (65) октябрь–декабрь 2024

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 23.12.2024. Выход в свет 26.12.2024. Бумага офсетная
Формат 70×108 1/16. Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 6,65. Печ. л. 4,75. Изд. № 222. Заказ № 25
Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

16+

Индекс журнала в Роспечати
82961