

мической ОФЭКТ, с использованием моделей 1TSM и NR, как с применением АС, так и без, были получены значения глобального и локального МК на фоне нагрузки и в состоянии покоя; абсолютного и относительного МР.

Сравнительный анализ моделей проводился с использованием метода Бланта-Альтмана. Диагностическую точность исследуемых моделей сравнивали с «золотым стандартом» – КАГ, с использованием ROC-анализа.

**Результаты.** Использование АС привело к более высоким значениям миокардиального кровотока и миокардиального резерва, полученным с помощью 1TSM, по сравнению со значениями, полученными с помощью 1TSM без использования АС. Самые низкие значения МК на фоне нагрузки и МК в покое были получены с помощью 1TSM без использования АС. МК в состоянии покоя, относительный и абсолютный МР были значимо ( $p < 0,05$ ) выше в модели с использованием АС, чем в модели без использования АС. Все количественные данные динамической ОФЭКТ были значимо ( $p < 0,05$ ) выше в модели NR без использования АС, чем в модели 1T без использования АС. Наконец, показатели МК на фоне нагрузки и в покое и относительный МР показали значительно ( $p < 0,05$ ) более высокие значения при использовании 1TSM с использованием АС по сравнению с NR с использованием АС.

**Выводы.** Обе модели – 1TSM и NR – правильно отражают микроциркуляцию в коронарных сосудах и могут быть использованы в клинической практике для оценки количественной перфузии миокарда с помощью динамической ОФЭКТ. Коррекция аттенуации вносит наибольший вклад в результаты постобработки динамических данных ОФЭКТ и повышает согласованность и диагностическую точность представленных моделей.

#### Литература

1. SNMMI Cardiovascular Council Board of Directors; ASNC Board of Directors. Clinical quantification of myocardial blood flow using PET: joint position paper of the SNMMI cardiovascular council and the ASNC / V. L. Murthy [et al.] // J. Nucl Med. – 2018. – Vol. 59, № 2. – P. 273–293.
2. Comparison of clinical tools for measurements of regional stress and rest myocardial blood flow assessed with  $^{13}\text{N}$ -ammonia PET/CT / P. J. Slomka [et al.] // Journal of Nuclear Medicine. – 2012. – Vol. 53, № 2. – P. 171–181.
3. Comparison between  $^{13}\text{N}$ -PET and  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin-CZT SPECT in the evaluation of absolute myocardial blood flow and flow reserve / Giubbini R. [et al.] // Journal of Nuclear Cardiology. – 2021. – Vol. 28, № 5. – P. 1906–1918.
4. First validation of myocardial flow reserve assessed by dynamic  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sestamibi CZT-SPECT camera: head to head comparison with  $^{15}\text{O}$ -water PET and fractional flow reserve in patients with suspected coronary artery disease. The WATERDAY study / Agostini D. [et al.] // European journal of nuclear medicine and molecular imaging. – 2018. – Vol. 45. – P. 1079–1090.

УДК 621.396

### ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Студентка гр. 11302123 Маковская В. М.

Кандидат физ.-мат. наук Красовский В. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

В настоящее время все диапазоны электромагнитного излучения в целом освоены, но не в равной степени. Начало же было положено 160 лет назад теоретическими работами Дж. К. Максвелла, который пришел к выводу о существовании единого электромагнитного поля и электромагнитных волн. В 1888 году Г. Герц экспериментально это подтвердил. Возникла беспроводная телеграфия. Радиоволны для вещания стали применять с начала 20 века на длинных волнах, так как короткие для этой цели считались малоэффективными. Диапазон длинных волн оказался очень «тесным» даже для речевого радиовещания, так как модуляция приводит к уширению полосы на величину около 40 кГц (удвоенный интервал звуковых частот). Вскоре было выяснено, что дальняя радиосвязь оказывается более эффективной как раз на коротких волнах с длинами в несколько десятков метров. «Вместимость» коротковолнового диапазона по количеству одновременно передающих радиостанций велика. В области метровых волн стало возможно телевизионное вещание, развиваемое с середины 20 века. Освоение дециметровых

волн позволило значительно увеличить число телевизионных каналов. Далее последовала очередь СВЧ-излучения (сантиметровые и миллиметровые волны), интенсивно осваемого по настоящее время, например, создание 4G и 5G сетей мобильной связи. Существенно, что электрические цепи в этом частотном диапазоне являются цепями с распределенными параметрами.

Максвелл положил, что свет является электромагнитным излучением. Это к концу 19 столетия было однозначно экспериментально подтверждено. К этому времени уже была развита оптическая спектроскопия, было открыто существование инфракрасного (ИК, У. Гершель, 1800 г.) и ультрафиолетового (УФ, И. В. Риттер, 1801 г.) излучения. Инфракрасное (тепловое) излучение – электромагнитное излучение, которое по шкале длин волн простирается от ~0,75 мкм (граница с видимым диапазоном) до сотен микрометров (дальний инфракрасный диапазон). С увеличением длины волны возрастают сложности в детектировании ИК-излучения. Достаточно эффективные фотоприемники для дальнего ИК диапазона появились только в последние десятилетия [1].

Между описанными выше областями находится терагерцовый диапазон (ТГД) с частотами в интервале от 0,1 до 10 ТГц (по длинам волн от 3 до 0,03 мм, в связи с чем называется также субмиллиметровым). Сложность работы в этом диапазоне частот связана с так называемой «терагерцовой ямой»: мощность источников излучения падает при приближении к этой области как со стороны радиочастот, так и со стороны ИК диапазона. По закону смещения Вина тепловое излучение в ТГД соответствует температурам 1–100 К. Энергетическая светимость тел с такой температурой согласно закону Стефана–Больцмана крайне низкая. Вместе с тем огромное количество объектов во Вселенной имеют температуру в указанном интервале.

Освоение терагерцового диапазона актуально в областях астрономии и астрофизики, для создания систем радиовидения, систем безопасности, навигации, пассивной локации, экологического мониторинга. В медицине терагерцовое излучение используется в томографии и для воздействия на раковые клетки [2]. До недавнего времени в качестве приемников в ТГД использовались только диоды с барьером Шоттки в весьма энергозатратных схемах. Сейчас используют микроболометры на  $\text{Bi}$ ,  $\text{VO}_x$ , и особенно на  $\text{Nb}$ , пирозлектрики. Наиболее эффективными являются ячейки Голея [3]. Для разных целей в качестве излучателей в ТГД используют лампу обратной волны, оротрон, гиротрон, лазер на свободных электронах [2]. На наш взгляд, перспективными излучателями являются генераторы на диодах Ганна и квантово-каскадные лазеры.

#### Литература

1. Михеев, С. В. Основы инфракрасной техники. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 127 с.
2. Григорьев, А. Д. Терагерцовая электроника / А. Д. Григорьев. – М.: Физматлит, 2020. – 305 с.
3. Гибин, И. С. Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор). / И. С. Гибин, П. Е. Котляр // Успехи прикладной физики. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 117–129.

УДК 004.94

### ПРИЛОЖЕНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛОВ

Студент гр. 11302123 Маковская В. М.

Кандидат техн. наук, доцент Бокуть Л. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Эллиптические интегралы – класс специальных функций, которые появляются при вычислении интегралов, включающих эллиптические кривые. Эллиптическими интегралами в общем случае называются интегралы вида

$$\int (x, \sqrt{R}) dx, \quad (1)$$

где  $R$  – рациональная функция.

Интегралы подобного вида Адриен Мари Лежандр привел к трем родам канонических интегралов: а именно, к эллиптическим интегралам первого, второго и третьего рода.

Эллиптические интегралы применяются в физике, инженерии, аналитической геометрии, небесной механике, электромагнетизме и теории чисел. В практическом применении эллиптические интегралы используются для определения траектории орбиты планеты, вычисления пе-