

**И.С. Михалко, И.В. Семченко**  
УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

## **РЕЗОНАНС В ДВОЙНОЙ ДНК-ПОДОБНОЙ СПИРАЛИ**

В данной работе сделана попытка на примере двойной ДНК-подобной проводящей спирали проиллюстрировать, как параметры реального проводника влияют на изменение резонансной частоты.

Рассмотрим двойную ДНК-подобную спираль с параметрами, соответствующими реальной молекуле ДНК. Угол подъема спирали  $\alpha = 28.4^\circ$ , радиус основания 1 мм (в реальной молекуле ДНК – около 1 нм). В реальности спирали ДНК очень длинные, до нескольких микрометров при радиусе в 1 нм, в нашем случае мы ограничимся двадцатью витками. Для моделирования очень длинной ДНК-спирали потребуется суперкомпьютер. Будем возбуждать спираль падающей сбоку линейно поляризованной волной и проанализируем излучение, испускаемое спиральными проводниками. Для волны, излучаемой спиралью, имеют место четко выраженные резонансы. Однако они не совпадают с теоретически ожидаемыми для реального проводника, что связано с изменением фазовой скорости волны в проводнике, по сравнению со скоростью света в вакууме.

В случаях, когда длина проводника в выпрямленном состоянии равна целому числу полувольт, имеет место резонанс, для которого выполняется условие

$$L = \frac{n\lambda}{2}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

При  $n=1$  наблюдается так называемый главный, или полуволновой резонанс. В действительности, для реального проводника резонансные частоты будут несколько отличаться от идеального случая. Это связано с тем, что скорость распространения электромагнитной волны в проводнике будет меньше, нежели в вакууме. Замедление волн в проводнике характеризуется так называемым коэффициентом укорочения

проводника, который можно определить как отношение скорости электромагнитной волны в вакууме к её скорости в проводнике

$$\xi = \frac{c}{v} . \quad (2)$$

С учетом коэффициента укорочения формула (1) видоизменится:

$$\xi L = \frac{n\lambda}{2} . \quad (3)$$

В общем случае определение коэффициента укорочения – нетривиальная задача. Он зависит от материала проводника, от площади его поперечного сечения, от типа волн и даже от соседних предметов, высоты антенны над уровнем земли и т.д. Кроме того, большое значение имеют краевые эффекты. Существует ряд эмпирических и экспериментальных способов определения коэффициента укорочения. Например, для экранированных линий передачи с Т-волной, коэффициент укорочения равен корню из относительной диэлектрической проницаемости материала заполнения. Способ вычисления коэффициента укорочения можно найти, например, в книге [1, с.48], [2, с.397], [3, с.76]. В нашей работе мы попытаемся оценить его значение для ДНК-подобной спирали.

Перед тем, как перейти к двадцати-витковой спирали, начнем с более простого случая. Рассмотрим три вида излучателей, каждый одинаковой длины, но разного типа (рисунок 1).

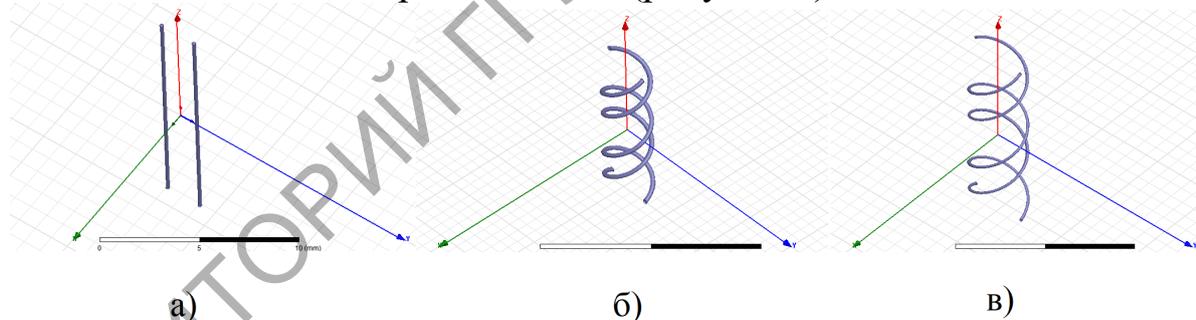


Рисунок 1 – Виды излучателей равной длины: а) прямые проводники, б) «толстая двойная спираль», в) «тонкая двойная спираль»

Первый – два параллельных прямых проводника длиной 14,28 мм и радиусом сечения 0,1 мм. Второй – двойная ДНК-подобная спираль такой же длины. Третий – двойная ДНК-подобная спираль той же длины, но проводники имеют вдвое меньший радиус сечения. Будем возбуждать их падающей волной и проанализируем их резонансные частоты.

Построим графики среднего по пространству поля излучения в зависимости от частоты для каждого вида излучателя (рисунок 2). Отметим на графиках ожидаемые резонансные частоты для идеального случая.

Графики охватывают диапазон пяти резонансных частот, которые реализуются при нечётных значениях  $n$ :  $n=1,3,5,7,9$ . Следующие резонансы становятся почти неразличимыми.

Если рассматривать чётные значения  $n$ , то на всей длине проводника укладывается целое число волн. В этом случае все излучатели, на которые можно разбить проводник, создают в окружающем пространстве взаимно компенсирующие поля. При этом суммарная волна, излучаемая всем проводником, является очень слабой.

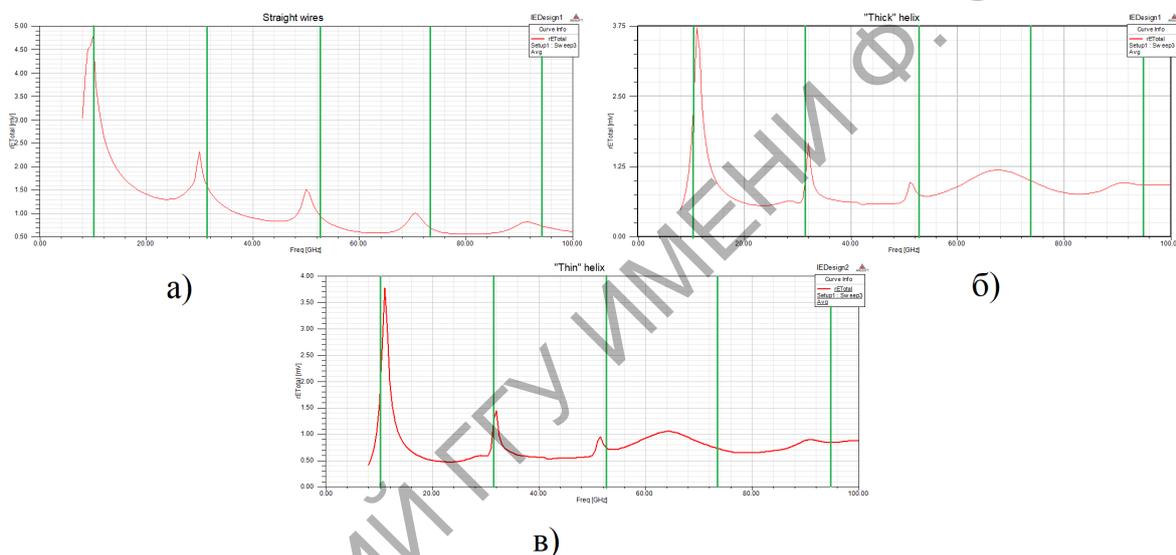


Рисунок 2 – Среднее излученное поле в зависимости от частоты:  
 а) прямые проводники; б) «толстые» спиральные проводники; в) «тонкие» спиральные проводники. Зелеными линиями отмечены резонансные частоты для идеального случая

В целом для всех случаев мы имеем весьма удовлетворительное совпадение с идеальным случаем без замедления волн. Правда, для спиральных проводников, начиная с четвертого резонанса, наблюдаются серьезные искажения. Графики для «толстой» и «тонкой» спиралей практически идентичны, поскольку во всех случаях длина волны существенно превышает диаметр проводника.

Теперь рассмотрим двойную ДНК-подобную спираль с двадцатью витками. Длина такой спирали – 142,882 мм, рассчитаем ожидаемые резонансные частоты:

$$\begin{cases} \nu_1 = 1.05 \text{ ГГц} \\ \nu_3 = 3.15 \text{ ГГц} \\ \nu_5 = 5.25 \text{ ГГц} \\ \nu_7 = 7.35 \text{ ГГц} \\ \nu_9 = 9.45 \text{ ГГц} \end{cases}$$

Как видно, на частоте полуволнового резонанса спираль излучает в нормальном режиме, диаграмма направленности подобна обычному электрическому дипольному излучателю (рисунок 3). Подобный результат был получен, например, в работе [4].

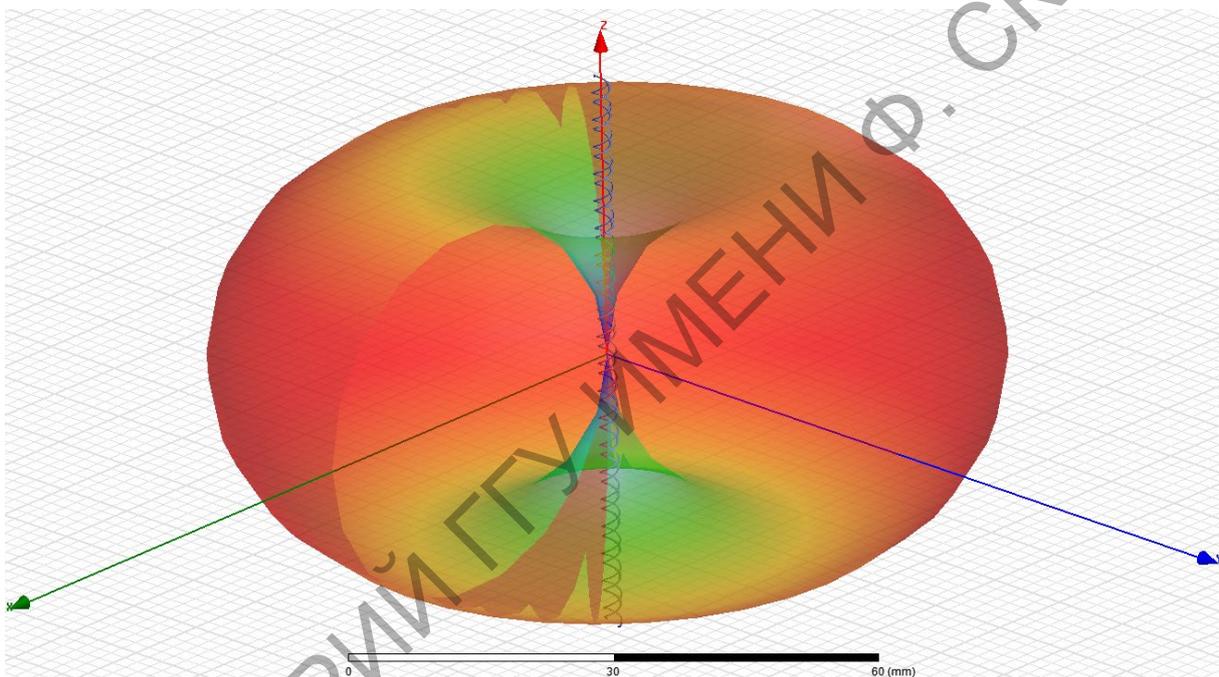


Рисунок 3 – Диаграмма направленности двойной ДНК-подобной спирали на частоте 1 ГГц

В отличие от спиралей с небольшой длиной, в данном случае искажения (отклонения от идеального случая) выражены намного сильнее. Наблюдается только четыре резонансные частоты вместо пяти ожидаемых (рисунок 4). В целом нет приемлемого совпадения для идеального и реального случая. Таким образом, можно прийти к выводу, что с увеличением длины спирального проводника возникают различные эффекты, приводящие к искажению условий резонанса, рассчитанных теоретически.

Представляет интерес следующая задача: используя средства компьютерного моделирования, получить оценку коэффициента укорочения

чения для спиральных проводников, в зависимости от различных параметров – площади поперечного сечения, длины проводника, материала проводника, его геометрии и т.д.

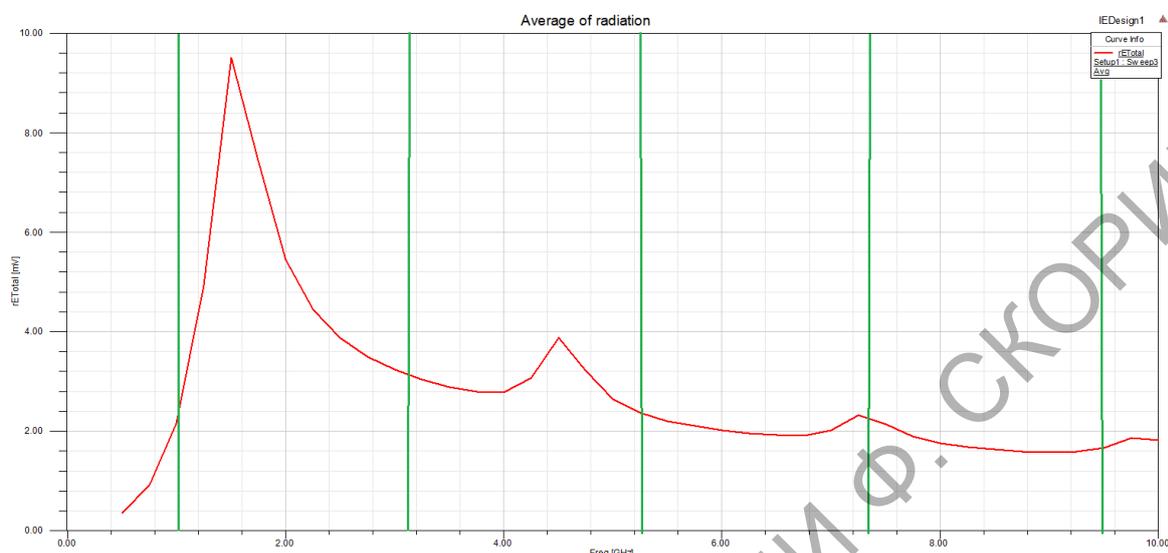


Рисунок 4 – Среднее излученное поле для двадцати-витковой двойной ДНК-подобной спирали в зависимости от частоты. Зелеными линиями отмечены резонансные частоты для идеального случая

Поскольку реальная молекула ДНК находится в водяной оболочке, она также обладает электропроводностью. Для этой молекулы возможны суперскрученное, расслабленное и линейное состояния [5]. Следовательно, проведенные исследования являются шагом при изучении возможности активации молекулы ДНК под действием внешнего электромагнитного поля, длина волны которого намного больше, чем длина витка спирали, и принадлежит к оптическому диапазону. В то же время длина волны может быть близкой к половине длины всей спирали и тем самым создавать условия резонансного взаимодействия.

### Литература

1. Ротхаммель, К. Антенны: в 2 т. Т.1 / К. Ротхаммель. – 11-е изд. – Мн.: «Наш город», 2001. – 416 с.
2. Марков, Г.Т. Антенны / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: «Энергия», 1975. – 528 с.
3. Юрцев, О.А. Спиральные антенны / О.А. Юрцев, А.В. Рунов, А.Н. Казарин. – М.: «Советское радио», 1974. – 224 с.

4. Михалко, И.С. Модель электромагнитного взаимодействия двойной ДНК-подобной спирали / И.С. Михалко, И.В. Семченко // Современные проблемы физики: Международной школа-конференция молодых ученых и специалистов, 13-15 июня 2018 г.: [сб. науч. тр.] / под ред. В.В. Машко, Д.В. Новицкого, М.С. Усачёнка. – Мн.: Институт физики НАН Беларуси, 2018. – С. 234–238.

5. DNA Damage by OH Radicals Produced Using Intense, Ultrashort, Long Wavelength Laser Pulses / A.K. Dharmadhikari [et al.] // Physical Review Letters. – 2014. – Vol. 112 – P. 138105.