

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный университет»

Физический факультет  
Кафедра электроники

**Исследование зарядовой модели излучения импульсных сигналов**

Отчет по НИРС  
Направление 03.04.03 «Радиофизика»  
Специализация «Информационные системы»

Обучающийся  
Руководитель  
Зав. кафедрой

д. ф.-м. н., профессор

Д. В. Шаповалов  
П. А. Кретов  
А. М. Бобрешов

Воронеж  
2019

## Оглавление

Введение.....	2
1 Зарядовая модель излучения импульсных сигналов.....	3
2. Численные расчёты излучения импульсных сигналов угловым вибратором.....	8
2.1 Угловой вибратор.....	8
2.2 Программная реализация.....	11
2.3 Полученные данные по итогам работы программы.....	11
3. CST Studio Suite.....	21
3.1. Результаты моделирования треугольной антенны.....	21
Заключение.....	54
Листинг А.....	55
Листинг Б.....	59

## Введение

Можно сказать, что любая импульсная антенна является сверхширокополосной, в то время как сверхширокополосная антенна, как правило, не может использоваться в качестве импульсной. К сожалению, в настоящее время в литературе обычно отсутствует четкое разделение этих антенн, что затрудняет взаимную трансляцию результатов теоретических и экспериментальных исследований, относящихся к сверхширокополосным и импульсным антеннам. В качестве примера можно привести уже упомянутую интересную и насыщенную фактическим материалом монографию [1], в которой попеременно, без четкого разделения, описываются вопросы, относящиеся как к сверхширокополосным, так и импульсным антеннам.

Важная область, где излучаются и принимаются сверхширокополосные импульсные сигналы, — это измерение характеристик антенн импульсным методом [2]. Преимущества импульсного метода измерения перед частотным здесь такие же, как и при измерении радиолокационных характеристик, т.е. измерение характеристик антенны (диаграммы направленности, коэффициента усиления, входного сопротивления и др.) в широкой полосе частот без специальных безэховых камер. Кроме того, импульсный метод позволяет измерять диаграмму направленности без вращения при небольшом числе датчиков. Здесь вместо движения в пространстве используется изменение сигналов во времени, вместо пространственных радиоголограмм, применяемых в антенной технике [3], можно использовать временные радиоголограммы.

Возможности сверхскоростной видеоимпульсной радиосвязи, пожалуй, наименее исследованы в настоящее время. Некоторые аспекты сверхширокополосной связи описаны в [4]. Очевидно, для повышения скорости передачи информации следует увеличивать полосу пропускания канала. Это приведет при сохранении центральной частоты к сверхширокополосным, в частности видеоимпульсным, каналам связи.

Основные подходы к процессам излучения, рассеяния и приёма электромагнитных волн основаны на рассмотрении этих процессов во временной области. Ввиду [5], временной подход обладает наглядностью и допускает простую физическую интерпретацию происходящих процессов, которая позволила построить модель излучения и приема волн [6], названную зарядовой моделью.

# 1 Зарядовая модель излучения импульсных сигналов

В основу модели излучения импульсных сигналов положен тот факт, что при подаче на вход антенны кратковременного импульса возникающее при этом возбуждение сосредоточено на одном или нескольких локальных участках антенны. Положение этих возбужденных участков с течением времени изменяется, они движутся вдоль проводников. Такие перемещающиеся в пространстве участки малых размеров удобно считать движущимися сосредоточенными зарядами. Поле излучения антенны можно подсчитать как сумму полей, создаваемых этими зарядами.

Сформулированные выше положения поясняются рис. 1.1. На рис. 1.1,а показано примерное расположение силовых линий вокруг провода в некоторый момент времени. Электрическое поле  $\vec{E}$  отлично от нуля на небольшом участке проводника. По нормальной составляющей поля  $E_n$  можно подсчитать поверхностную плотность заряда  $\sigma_{\text{пов}}$ :

$$\sigma_{\text{пов}}(t) = \epsilon E_n(t)$$

Плотность  $\sigma_{\text{пов}}$  можно также подсчитать через уравнение непрерывности, если известен ток в проводнике.

Для тонких проводников зависимость поверхностной плотности заряда от поперечных координат может не учитываться. Зависимость линейной плотности заряда  $\rho$  от продольной координаты  $l$  изображена на рис. 1.1,б. На рис. 1.1,в показан заменяющий этот распределенный заряд сосредоточенный заряд  $q$ , движущийся вдоль проводника с некоторой скоростью  $v$ , зависящей от времени  $t$ . Полагается, что поле излучения этого сосредоточенного заряда близко к истинному полю  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  на рис. 1.1,а.

Представление излучения проволочных антенн полями сосредоточенных движущихся зарядов составляет суть зарядовой модели. Подчеркнем, что переход при расчетах от обычно используемых токов к зарядам погрешности не вносит. Ток по определению представляет движение зарядов. Погрешность возникает при переходе от реальных движений к упрощенным и замене распределенных зарядов сосредоточенными.

Приведем аргументы, которые могли бы убедить в праве на существование зарядовой модели. К сожалению, вывод модели из интегральных уравнений или из уравнений Максвелла авторам получить не удалось, и нельзя строго указать, с какой точностью справедлива зарядовая модель для различных антенн. Поэтому приведем ссылки на результаты эксперимента, численного анализа и на модели в частотной области, которые убедили бы в справедливости зарядовой модели.

Начнем аргументацию с известных частотных представлений, временная интерпретация которых приводит к зарядовой модели. Рассмотрим простейший асимметричный вибратор — штырь над идеально проводящей плоскостью, возбуждаемый у основания (рис.1.2,а). Известно [7], что характеристики такой антенны приближенно могут быть подсчитаны, если считать, что ток в штыре

распределен так же, как в отрезке длинной линии, разомкнутой на конце, т.е. распределение тока имеет характер стоячей волны с узлом на конце.

Рассмотрим возбуждение антенны на рис. 1.2,а импульсным сигналом и будем полагать, что представление об антенне как об отрезке длинной линии, разомкнутой на конце, справедливо для всех частот в спектре возбуждающего импульса. Для анализа антенны при этом предположении следует определить ток или закон движения заряда в отрезке линии на рис. 1.2,б

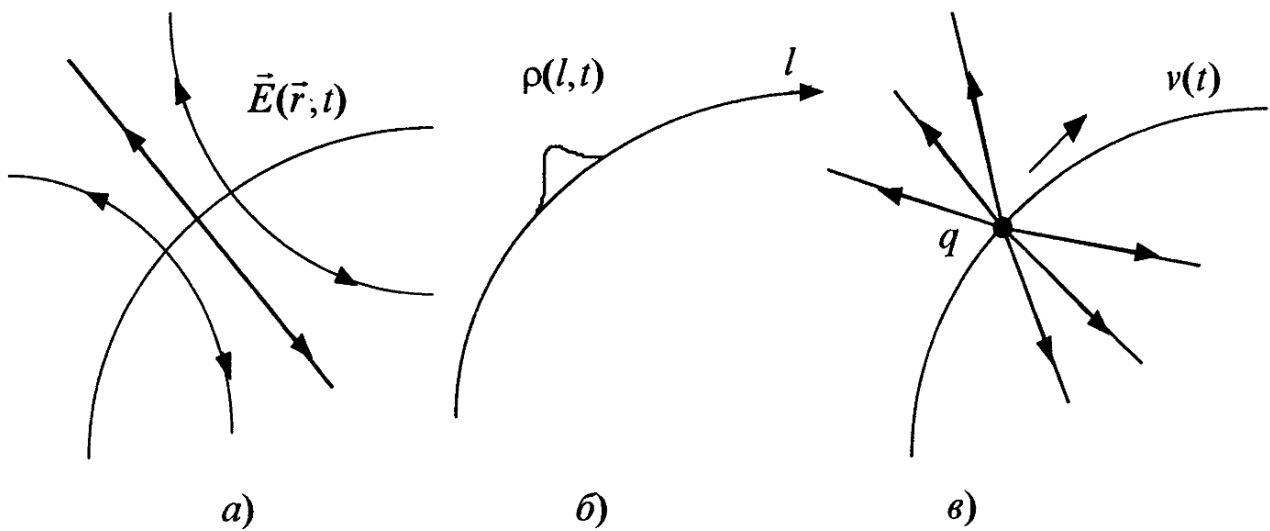


Рис.1.1. Зарядовая модель антенны:

а - силовые линии поля вблизи проводника, возбужденного импульсным сигналом; б - зависимость плотности заряда на проводнике от продольной координаты; в - поле сосредоточенного заряда, заменяющего распределенный.

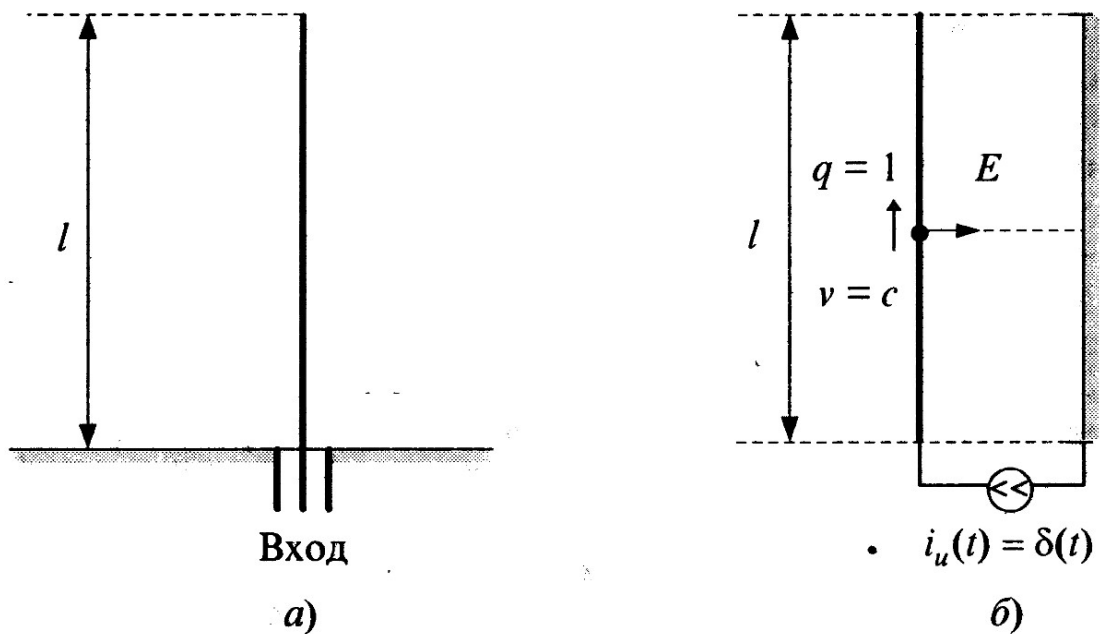


Рис.1.2. Модель вибраторной антенны:

а - несимметричный вибратор; б - отрезок длинной линии, заменяющий вибратор, возбуждаемый импульсным сигналом.

В воздушной длинной линии импульсный сигнал ( $\delta$ -импульс) распространяется без искажений, отражается от разомкнутого конца и возвращается обратно. Если линия и источник не согласованы, то возникают переотражения; если же они согласованы на всех частотах, то переотражений не будет. Пространственные размеры возбужденного в линии участка  $\Delta l$  определяются длительностью импульса  $\Delta t$  ( $\Delta l = c \Delta t$ ) и при  $\delta$ -импульсном сигнале равны нулю, т.е. распространяющийся заряд можно считать сосредоточенным. Величина заряда определяется интегралом от входного тока и при  $i_{bx}(t) = \delta(t)$  равна единице (1 Кл):

$$q = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad .$$

Таким образом, частотный и временной подходы к физическим процессам в штыревой антенне окажутся не противоречащими друг другу, если при подаче на штырь  $\delta$ -импульсного тока в нем возникает единичный сосредоточенный заряд. Этот заряд движется со скоростью света от основания штыря к вершине, отражается от нее и возвращается обратно ко входу. Если сопротивление на входе согласовано с волновым сопротивлением штыря, то этот заряд поглощается на входе, в противном случае возникают многократные переотражения. Отметим, что для учета влияния идеально проводящей плоскости следует рассмотреть зеркальное движение противоположного по знаку заряда.

Итак, зарядовая модель соответствует представлению проволочной антенны в виде воздушной длинной линии с постоянным волновым сопротивлением. Расширяя этот пример, будем полагать, что в проволочных антеннах при импульсном возбуждении распространяются сосредоточенные заряды. Траектории движения зарядов определяются формой проводников, а скорость движения равна скорости света. Такое представление о характере излучения сигналов проволочной антенной и назовем зарядовой моделью проволочной антенны.

В качестве второй группы аргументов в пользу зарядовой модели существуют результаты экспериментов, подтверждающих эту модель [8][9]. В указанных работах приведены экспериментальные результаты по возбуждению проволочных антенн импульсным сигналом. Отмечается, что результаты эксперимента получают качественное объяснение, если считать, что по антенне движется со скоростью света сосредоточенный заряд. Излучение возникает при ускорении заряда, т.е. при изменении направления его движения.

Приведённые в данной работе вычисления основаны на принципах, изложенных в [6], Авторы которых утверждают то, что эта модель может быть использована не только для качественного объяснения физических процессов, но и при расчетах для анализа и синтеза антенн во временной области.

Для антенн, содержащих металлические поверхности и металлические тела, также можно применить зарядовую модель, хотя и не без некоторых трудностей. При подаче импульсного воздействия на такие антенны возникают

возбужденные локальные участки, но они в некоторый момент времени сосредоточены около каких-либо линий на поверхности, т. е. приходится рассматривать движение заряженных линий на поверхности тела. Конечно, при этом указать априорно характер движения зарядов еще сложнее, чем для проволочных антенн. Вывод общих соотношений, связывающих характер движения зарядов на поверхности тела с геометрическими характеристиками поверхности, представляет важную задачу для дальнейшего развития импульсной электродинамики.

Основное достоинство зарядовой модели — это наглядность, причем не только в представлении физических процессов, но и при выполнении расчетов.



## 2. Численные расчёты излучения импульсных сигналов угольным вибратором

### 2.1 Угольный вибратор

Угольный вибратор, состоящий из двух тонких проводников, расположенных под углом  $2\beta$  друг к другу, схематично показан на рис. 2.1. При расчете поля  $E(t)$ , возникающего при воздействии на антенну  $\delta$ -импульса, следует рассмотреть прямое движение вдоль проводников положительного и отрицательного единичных зарядов и возвращение их обратно.

Определим поле в ближней зоне и рассмотрим его особенности по сравнению с полем в дальней зоне, вывод которого представлен в [6]. Для вычисления поля, создаваемого вершинами проводников, обратимся к рис. 2.2. На этом рисунке изображена новая ось  $z'$  проведенная из верхней точки излома траектории через точку наблюдения, и показаны необходимые для расчетов по А.13) углы  $\alpha^+$  и  $\alpha^-$ , расстояние  $R'$  и угол  $\gamma$ . Все эти величины определяются из рис. 2.2:

$$R' = (R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta); \quad (2.1)$$

$$\cos \gamma = \frac{R - l \cos \beta}{R'};$$

$$\alpha^{(пол)} = \pi - \beta - \gamma;$$

$$\alpha^{(отр)} = \beta + \gamma.$$

Величина поля, создаваемого верхним зарядом, получается из (1.13) сложением полей [6]  $E^{(+)}$  и  $E^{(-)}$ , с учётом заряда равного 1 Кл:

$$E_s = \frac{\omega}{4\pi R'} \left( \operatorname{tg} \frac{\beta + \gamma}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\beta + \gamma}{2} \right) \delta \left( t - \frac{l + R'}{c} \right) = \frac{\omega}{2\pi R' \sin(\beta + \gamma)} \delta \left( t - \frac{l + R'}{c} \right).$$

Складывая векторно аналогичное поле для нижнего заряда, находим выражение для центрального импульса поля в ближней зоне:

$$E = \frac{\omega}{\pi R'} \frac{\cos \gamma}{\sin(\beta + \gamma)} \delta \left( t - \frac{l + R'}{c} \right).$$

Входящее в знаменатель выражение  $R' \sin(\beta + \gamma)$  преобразуется с учетом равенств  $R' \sin \gamma = l \sin \beta$ ,  $R' \cos \gamma = R - l \cos \beta$  (см. рис. 2.2) к виду  $R \sin \beta$ . Тогда анализируемое слагаемое примет вид:

$$E = \frac{\omega}{\pi R} \frac{\cos \gamma}{\sin \beta} \delta \left( t - \frac{l + R'}{c} \right). \quad (2.2)$$

Так же, известно [6], что поле в дальней зоне определяется как:

$$E_\Theta = \frac{-\omega}{4\pi R} \left\{ \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} \delta(t) - \frac{2}{\sin \beta} \delta \left[ t - \frac{l}{c} \cos \beta \right] + \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \delta \left( t - \frac{2l}{c} \right) \right\} \quad (2.3)$$

Учитывая остающиеся неизменными первое и третье слагаемые в выражении для дальней зоны, добавляя к ним (2.2) с учетом (2.1), получаем окончательное выражение для поля в ближней зоне:

$$E = \frac{-\omega}{4\pi R} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} \delta(t) - 2 \frac{\cos \gamma}{\sin \beta} \delta\left(t - \frac{l + \sqrt{R^2 + l^2 - 2 R l \cos \beta} - R}{c}\right) + \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \delta\left(t - \frac{l + R'}{c}\right). \quad (2.4)$$

Сравнение полей в дальней (2.3) и ближней (2.4) зонах подтверждает, что различие между ними при линейно-ломаной траектории носит количественный, а не качественный характер, изменяются расстояние между импульсами и их величины. В данном примере уменьшается за счет множителя  $\cos(\gamma)$  центральный импульс относительно первого и последнего. Таким образом, подчеркивается излучение из тех точек, к которым приближается наблюдатель.

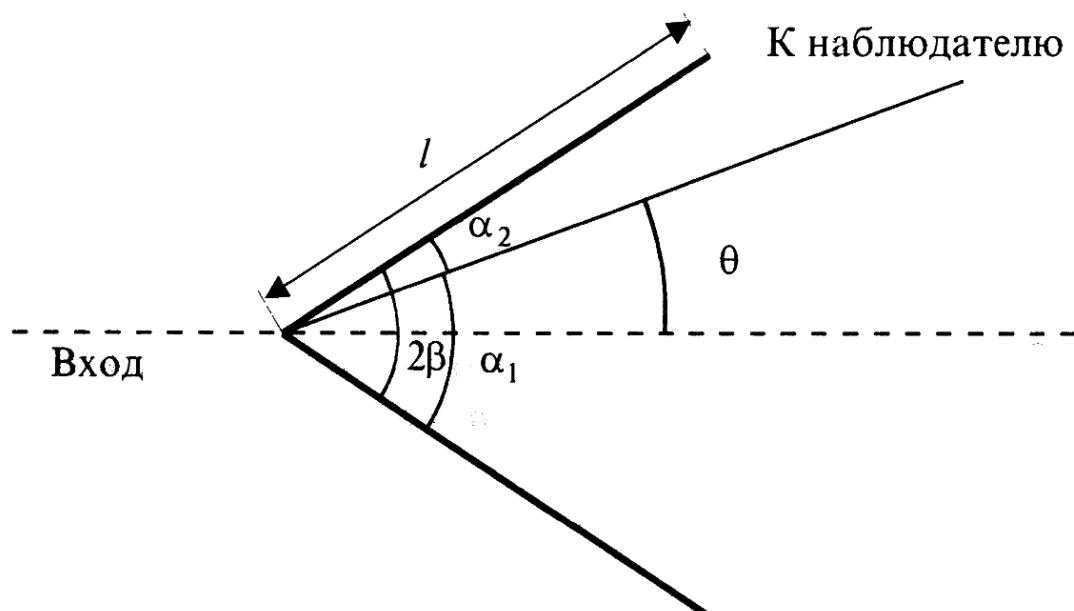


Рис. 2.1. Угловой вибратор

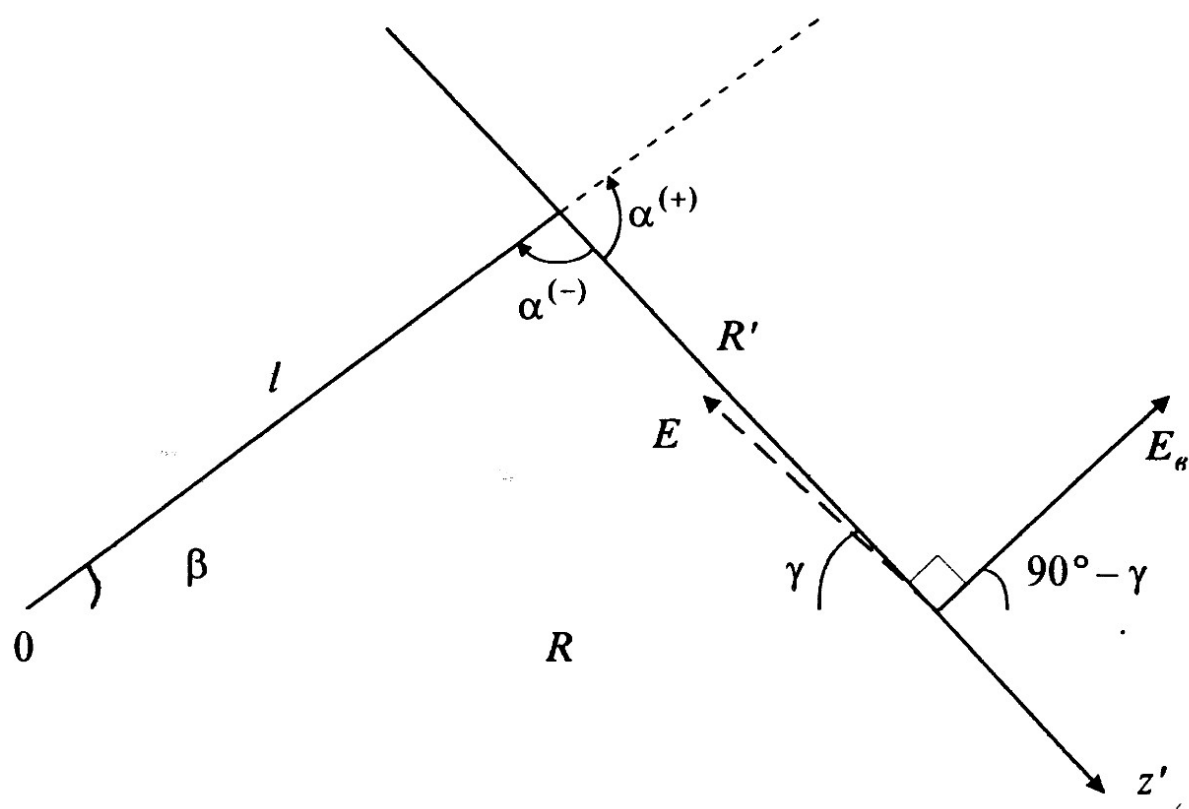


Рис. 2.2. К расчету поля излучения конца провода углового вибратора

## 2.2 Программная реализация

Ввиду большого количества данных и относительной сложности вычислений было решено перенести численные вычисления полей на программный код [10].

В качестве языка программирования был выбран с++ ввиду ожидаемой сложности вычислений. Данный язык позволяет писать более производительный код, по сравнению с аналогами.

Результаты в дальнейшем будут сравнены с данными, полученными в результате моделирования в признанной многими программистами CST STUDIO SUITE. В ней были проведены вычисления методом конечных разностей во временной области, которые, как утверждается в [6] не должны сильно противоречить результатам зарядовой модели. Разница должна сказываться только на способе излучения энергии.

В файле, представленном в листинге А продемонстрированы функции, рассчитывающие поля E и H. Помимо этого, там происходит вычисление времени длительности импульса  $\tau$ . Как увидим позже, импульс занимает очень малое время.

Листинг Б демонстрирует реализации необходимых структур, для хранения данных, а так же произведения над ними некоторых действий.

Структура SolvedData содержит в себе результаты вычисленных значений. Функция FindMin() находит минимальное время регистрации начала импульса. NormE(), в свою очередь производит преобразование данных для электрического поля по модулю

Структура Nvalues представляет собой хранилище входных данных:

- 1) расстояние до точки наблюдения;
- 2) длина плеча;
- 3) угол бетта.

Так же, в ней определены ввод начальных данных и нормирование угла бетта на 2.

## 2.3 Полученные данные по итогам работы программы

На вход были поданы следующие значения:

- 1) для расстояния от начала координат до точки наблюдения: 5, 10, 15, 20, 25 сантиметров;
- 2) для длины плеча: 5, 10, 15, 20, 25 сантиметров;
- 3) для углов бетта: 10, 20, 30, 40 градусов.

Стоит отметить, что такой выбор точек был не случайным. В данной работе хотели получить наиболее объёмные результаты, но в связи ограничений в студенческой копии программы CST STUDIO SUITE, а так же не возможностью использования профессиональной версией, были наложены

ограничения на выбор входных данных. В случае подачи на вход значений 25, 25, 40, а так же максимальном сокращении используемых клеток, их было достигнуто немногим более 29 тысяч, при имеющемся пределе в 30 тысяч.

По большей части, результаты удовлетворяют интересам данной работы, однако, в дальнейшем будет указано на некоторые не состыковки, связанные с выбранными частотами симуляции в CST Studio Suite.

Так же, отметим, что на данном этапе интересны результаты только на оси, исходящей от начала координат, и имеющая углы  $\beta/2$  к плечам антенны.

Данные предоставлены в виде таблиц с подписями о поступивших входных данных в формате время тау, напряженность E.

I = 0.05 R = 0.05 betta = 10		I = 0.05 R = 0.05 betta = 20		I = 0.05 R = 0.05 betta = 30	
0.971742	0.0436609	0.945087	0.0874887	0.919948	0.131653
1.15954	1.00096	1.12178	1.00382	1.08654	1.00863
1.15954	0.0436609	1.12178	0.0874887	1.08654	0.131653
1.17942	39.6358	1.15957	8.75867	1.14046	10.9419
1.28383	0.0436609	1.23844	0.0874887	1.19678	0.131653
1.43731	1.00096	1.37975	1.00382	1.32682	1.00863
1.46798	39.6358	1.43736	8.75867	1.4081	10.9419
1.63331	1.00096	1.56055	0.0874887	1.49498	1.00863
1.63331	0.0436609	1.56055	1.00382	1.49498	0.131653
1.67304	39.6358	1.63466	8.75867	1.59898	10.9419
2.24423	1.00096	2.10911	1.00382	1.99108	1.00863
2.31993	39.6358	2.24678	8.75867	2.17993	10.9419
I = 0.05 R = 0.05 betta = 40		I = 0.05 R = 0.1 betta = 10		I = 0.05 R = 0.1 betta = 20	
0.896246	0.176327	0.428108	0.0436609	0.426746	0.0874887
1.05363	1.01543	0.461001	22.6014	0.459423	10.843
1.05363	0.176327	0.499369	0.0436609	0.497518	0.0874887
1.12206	45.6672	0.521095	0.0436609	0.519209	0.0874887
1.15851	0.176327	0.544704	22.6014	0.542502	10.843
1.27807	1.01543	0.545079	39.6358	0.543974	8.75867
1.38017	45.6672	0.570656	22.6014	0.568395	10.843
1.43573	1.01543	0.630636	0.0436609	0.627875	0.0874887
1.43573	0.176327	0.666106	39.6358	0.664456	8.75867
1.56586	45.6672	0.704704	22.6014	0.701259	10.843
1.88736	1.01543	0.705332	39.6358	0.703721	8.75867
2.11883	45.6672	0.922137	39.6358	0.919384	8.75867
I = 0.05 R = 0.1 betta = 30		I = 0.05 R = 0.1 betta = 40		I = 0.05 R = 0.15 betta = 10	
0.42457	0.131653	0.421697	0.176327	0.272586	0.0436609
0.456901	6.75515	0.453576	4.61563	0.285559	22.7516
0.494562	0.131653	0.490669	0.176327	0.3156	0.0436609
0.516205	0.131653	0.512266	0.176327	0.324141	0.0436609
0.538989	6.75515	0.534368	4.61563	0.333122	22.7516
0.542203	10.9419	0.539855	45.6672	0.342653	22.7516
0.564797	6.75515	0.560085	4.61563	0.352823	39.6358
0.623488	0.131653	0.61775	0.176327	0.386836	0.0436609
0.661815	10.9419	0.65832	45.6672	0.413495	22.7516
0.695791	6.75515	0.688653	4.61563	0.428397	39.6358
0.701155	10.9419	0.697791	45.6672	0.444288	39.6358
0.91501	10.9419	0.909289	45.6672	0.57117	39.6358

I = 0.05 R = 0.15 betta = 20		I = 0.05 R = 0.15 betta = 30		I = 0.05 R = 0.15 betta = 40	
0.272167	0.0874887	0.271482	0.131653	0.27055	0.176327
0.285099	11.129	0.284347	7.15195	0.283326	5.09324
0.315038	0.0874887	0.314121	0.131653	0.312875	0.176327
0.323599	0.0874887	0.322715	0.131653	0.321518	0.176327
0.332496	11.129	0.331474	7.15195	0.330087	5.09324
0.342046	11.129	0.341059	7.15195	0.339723	5.09324
0.352471	8.75867	0.351896	10.9419	0.351113	45.6672
0.386063	0.0874887	0.384806	0.131653	0.383106	0.176327
0.412612	11.129	0.411176	7.15195	0.409236	5.09324
0.427879	8.75867	0.427032	10.9419	0.425879	45.6672
0.443825	8.75867	0.443072	10.9419	0.442055	45.6672
0.570405	8.75867	0.569162	10.9419	0.567486	45.6672
I = 0.05 R = 0.2 betta = 10		I = 0.05 R = 0.2 betta = 20		I = 0.05 R = 0.2 betta = 30	
0.199932	0.0436609	0.199731	0.0874887	0.199401	0.131653
0.206824	22.7925	0.206609	11.2088	0.206255	7.2671
0.230679	0.0436609	0.230411	0.0874887	0.229971	0.131653
0.235209	0.0436609	0.234957	0.0874887	0.234544	0.131653
0.239903	22.7925	0.239613	11.2088	0.239137	7.2671
0.244806	22.7925	0.244533	11.2088	0.244086	7.2671
0.260812	39.6358	0.260641	8.75867	0.260359	10.9419
0.278951	0.0436609	0.278596	0.0874887	0.278016	0.131653
0.292552	22.7925	0.292162	11.2088	0.291524	7.2671
0.315705	39.6358	0.315454	8.75867	0.315042	10.9419
0.324252	39.6358	0.324038	8.75867	0.323687	10.9419
0.413676	39.6358	0.413327	8.75867	0.412756	10.9419
I = 0.05 R = 0.2 betta = 40		I = 0.05 R = 0.25 betta = 10		I = 0.05 R = 0.25 betta = 20	
0.198947	0.176327	0.157855	0.0436609	0.157737	0.0874887
0.20577	5.23882	0.16212	22.8112	0.161996	11.2456
0.229369	0.176327	0.181766	0.0436609	0.18161	0.0874887
0.23398	0.176327	0.184567	0.0436609	0.184422	0.0874887
0.238486	5.23882	0.187444	22.8112	0.187278	11.2456
0.243475	5.23882	0.190424	22.8112	0.19027	11.2456
0.259973	45.6672	0.206863	39.6358	0.206761	8.75867
0.277224	0.176327	0.218114	0.0436609	0.217912	0.0874887
0.290653	5.23882	0.226342	22.8112	0.226124	11.2456
0.314476	45.6672	0.24995	39.6358	0.249803	8.75867
0.323209	45.6672	0.255278	39.6358	0.255155	8.75867
0.41198	45.6672	0.324258	39.6358	0.324059	8.75867
I = 0.05 R = 0.25 betta = 30		I = 0.05 R = 0.25 betta = 40		I = 0.1 R = 0.05 betta = 10	
0.157543	0.131653	0.157276	0.176327	0.748581	0.0436609
0.161792	7.32073	0.16151	5.30769	0.85529	0.0436609
0.181352	0.131653	0.180999	0.176327	0.997479	22.8614
0.184184	0.131653	0.183858	0.176327	0.997795	0.0436609
0.187005	7.32073	0.186629	5.30769	0.998738	79.2716
0.190017	7.32073	0.18967	5.30769	1.19637	22.8614
0.206595	10.9419	0.206365	45.6672	1.19683	0.0436609
0.21758	0.131653	0.217125	0.176327	1.19818	79.2716
0.225767	7.32073	0.225277	5.30769	1.49504	22.8614
0.249559	10.9419	0.249224	45.6672	1.49787	79.2716
0.254954	10.9419	0.254678	45.6672	1.9912	22.8614
0.323735	10.9419	0.323291	45.6672	1.99622	79.2716

I = 0.1 R = 0.05 betta = 20		I = 0.1 R = 0.05 betta = 30		I = 0.1 R = 0.05 betta = 40	
0.744429	0.0874887	0.737831	0.131653	0.729199	0.176327
0.849874	0.0874887	0.841285	0.131653	0.830081	0.176327
0.99012	11.3527	0.978483	7.49617	0.963359	5.56524
0.991372	0.0874887	0.981256	0.131653	0.968192	0.176327
0.995035	17.5173	0.989124	21.8837	0.981337	91.3344
1.1858	11.3527	1.16915	7.49617	1.14762	5.56524
1.1876	0.0874887	1.17311	0.131653	1.15449	0.176327
1.19286	17.5173	1.18437	21.8837	1.17323	91.3344
1.48067	11.3527	1.45822	7.49617	1.42955	5.56524
1.49169	17.5173	1.48198	21.8837	1.4695	91.3344
1.96578	11.3527	1.9264	7.49617	1.87669	5.56524
1.98525	17.5173	1.96809	21.8837	1.94615	91.3344
I = 0.1 R = 0.1 betta = 10		I = 0.1 R = 0.1 betta = 20		I = 0.1 R = 0.1 betta = 30	
0.485871	0.0436609	0.472543	0.0874887	0.459974	0.131653
0.579769	1.00096	0.560892	1.00382	0.543271	1.00863
0.579769	0.0436609	0.560892	0.0874887	0.543271	0.131653
0.589711	79.2716	0.579787	17.5173	0.570228	21.8837
0.641914	0.0436609	0.619221	0.0874887	0.598392	0.131653
0.718653	1.00096	0.689874	1.00382	0.663408	1.00863
0.733992	79.2716	0.718681	17.5173	0.704051	21.8837
0.816655	1.00096	0.780276	0.0874887	0.747489	1.00863
0.816655	0.0436609	0.780276	1.00382	0.747489	0.131653
0.83652	79.2716	0.817331	17.5173	0.799491	21.8837
1.12211	1.00096	1.05456	1.00382	0.995541	1.00863
1.15996	79.2716	1.12339	17.5173	1.08996	21.8837
I = 0.1 R = 0.1 betta = 40		I = 0.1 R = 0.15 betta = 10		I = 0.1 R = 0.15 betta = 20	
0.448123	0.176327	0.299324	0.0436609	0.297402	0.0874887
0.526816	1.01543	0.332499	22.1846	0.33013	10.1096
0.526816	0.176327	0.352006	0.0436609	0.349351	0.0874887
0.561031	91.3344	0.373989	0.0436609	0.371126	0.0874887
0.579257	0.176327	0.374472	79.2716	0.372964	17.5173
0.639033	1.01543	0.398799	22.1846	0.395395	10.1096
0.690084	91.3344	0.427252	22.1846	0.423519	10.1096
0.717867	1.01543	0.460008	0.0436609	0.455684	0.0874887
0.717867	0.176327	0.460738	79.2716	0.458458	17.5173
0.782932	91.3344	0.49914	79.2716	0.496702	17.5173
0.943679	1.01543	0.543318	22.1846	0.537296	10.1096
1.05942	91.3344	0.665139	79.2716	0.660816	17.5173
I = 0.1 R = 0.15 betta = 30		I = 0.1 R = 0.15 betta = 40		I = 0.1 R = 0.2 betta = 10	
0.294494	0.131653	0.290898	0.176327	0.214054	0.0436609
0.32655	5.84472	0.322134	3.64816	0.2305	22.6014
0.345345	0.131653	0.34041	0.176327	0.249684	0.0436609
0.366824	0.131653	0.361561	0.176327	0.260548	0.0436609
0.370669	21.8837	0.367807	91.3344	0.272352	22.6014
0.390271	5.84472	0.383981	3.64816	0.272539	79.2716
0.417926	5.84472	0.411108	3.64816	0.285328	22.6014
0.449216	0.131653	0.441349	0.176327	0.315318	0.0436609
0.454995	21.8837	0.450691	91.3344	0.333053	79.2716
0.49303	21.8837	0.488528	91.3344	0.352352	22.6014
0.528327	5.84472	0.517478	3.64816	0.352666	79.2716
0.654334	21.8837	0.646426	91.3344	0.461068	79.2716

I = 0.1 R = 0.2 beta = 20		I = 0.1 R = 0.2 beta = 30		I = 0.1 R = 0.2 beta = 40	
0.213373	0.0874887	0.212285	0.131653	0.210849	0.176327
0.229711	10.843	0.228451	6.75515	0.226788	4.61563
0.248759	0.0874887	0.247281	0.131653	0.245334	0.176327
0.259604	0.0874887	0.258103	0.131653	0.256133	0.176327
0.271251	10.843	0.269495	6.75515	0.267184	4.61563
0.271987	17.5173	0.271101	21.8837	0.269927	91.3344
0.284197	10.843	0.282399	6.75515	0.280042	4.61563
0.313937	0.0874887	0.311744	0.131653	0.308875	0.176327
0.332228	17.5173	0.330908	21.8837	0.32916	91.3344
0.350629	10.843	0.347896	6.75515	0.344326	4.61563
0.35186	17.5173	0.350578	21.8837	0.348896	91.3344
0.459692	17.5173	0.457505	21.8837	0.454645	91.3344
I = 0.1 R = 0.25 beta = 10		I = 0.1 R = 0.25 beta = 20		I = 0.1 R = 0.25 beta = 30	
0.16655	0.0436609	0.166203	0.0874887	0.165641	0.131653
0.176339	22.7061	0.175951	11.0411	0.175321	7.02736
0.19339	0.0436609	0.192923	0.0874887	0.192166	0.131653
0.199844	0.0436609	0.199383	0.0874887	0.198638	0.131653
0.206716	22.7061	0.206182	11.0411	0.205318	7.02736
0.214107	22.7061	0.213578	11.0411	0.212723	7.02736
0.214189	79.2716	0.213902	17.5173	0.213436	21.8837
0.239775	0.0436609	0.239113	0.0874887	0.238042	0.131653
0.260604	22.7061	0.259821	11.0411	0.258557	7.02736
0.260726	79.2716	0.260301	17.5173	0.259611	21.8837
0.272594	79.2716	0.272201	17.5173	0.271565	21.8837
0.352718	79.2716	0.35206	17.5173	0.350997	21.8837
I = 0.1 R = 0.25 beta = 40		I = 0.15 R = 0.05 beta = 10		I = 0.15 R = 0.05 beta = 20	
0.164883	0.176327	0.599317	0.0436609	0.597293	0.0874887
0.174472	4.93928	0.665823	0.0436609	0.663326	0.0874887
0.191147	0.176327	0.79909	0.0436609	0.796407	0.0874887
0.197639	0.176327	0.855749	22.9258	0.851629	11.475
0.204155	4.93928	0.856445	118.907	0.854377	26.276
0.211578	4.93928	0.921866	0.0436609	0.918296	0.0874887
0.212806	91.3344	0.998104	22.9258	0.992503	11.475
0.236609	0.176327	0.999051	118.907	0.996238	26.276
0.256868	4.93928	1.33081	22.9258	1.32338	11.475
0.25868	91.3344	1.33249	118.907	1.33003	26.276
0.270714	91.3344	1.71011	22.9258	1.69787	11.475
0.349577	91.3344	1.7129	118.907	1.70883	26.276
I = 0.15 R = 0.05 beta = 30		I = 0.15 R = 0.05 beta = 40		I = 0.15 R = 0.1 beta = 10	
0.594004	0.131653	0.589564	0.176327	0.427194	0.0436609
0.659272	0.131653	0.653808	0.176327	0.498126	0.0436609
0.792084	0.131653	0.786332	0.176327	0.543225	22.6116
0.844958	7.6656	0.836003	5.76866	0.544337	118.907
0.851007	32.8256	0.846441	137.002	0.569136	0.0436609
0.912554	0.131653	0.904927	0.176327	0.663339	22.6116
0.983454	7.6656	0.971344	5.76866	0.664998	118.907
0.991658	32.8256	0.985464	137.002	0.702387	0.0436609
1.31149	7.6656	1.29579	5.76866	0.795514	22.6116
1.32612	32.8256	1.32104	137.002	0.797902	118.907
1.67834	7.6656	1.65272	5.76866	1.08258	22.6116
1.70238	32.8256	1.69402	137.002	1.08701	118.907



I = 0.15 R = 0.1 beta = 20		I = 0.15 R = 0.1 beta = 30		I = 0.15 R = 0.1 beta = 40	
0.42329	0.0874887	0.417422	0.131653	0.410234	0.176327
0.492826	0.0874887	0.48489	0.131653	0.475218	0.176327
0.536928	10.9143	0.527522	6.95387	0.516094	4.9912
0.541158	26.276	0.536338	32.8256	0.530368	137.002
0.562683	0.0874887	0.553101	0.131653	0.541558	0.176327
0.653974	10.9143	0.640073	6.95387	0.623326	4.9912
0.660259	26.276	0.653099	32.8256	0.644268	137.002
0.692585	0.0874887	0.678124	0.131653	0.660855	0.176327
0.782963	10.9143	0.764532	6.95387	0.742652	4.9912
0.791989	26.276	0.783191	32.8256	0.772573	137.002
1.05947	10.9143	1.026	6.95387	0.98698	4.9912
1.07607	26.276	1.05989	32.8256	1.04054	137.002
I = 0.15 R = 0.15 beta = 10		I = 0.15 R = 0.15 beta = 20		I = 0.15 R = 0.15 beta = 30	
0.323914	0.0436609	0.315029	0.0874887	0.306649	0.131653
0.386512	1.00095	0.373928	1.00382	0.362181	1.00863
0.386512	0.0436609	0.373928	0.0874887	0.362181	0.131653
0.393141	118.907	0.386525	26.276	0.380152	32.8256
0.427942	0.0436609	0.412814	0.0874887	0.398928	0.131653
0.479102	1.00095	0.459916	1.00382	0.442272	1.00863
0.489328	118.907	0.479121	26.276	0.469368	32.8256
0.544436	0.0436609	0.520184	1.00382	0.498326	1.00863
0.544436	1.00095	0.520184	0.0874887	0.498326	0.131653
0.55768	118.907	0.544887	26.276	0.532994	32.8256
0.748076	1.00095	0.703038	1.00382	0.663694	1.00863
0.77331	118.907	0.748928	26.276	0.726642	32.8256
I = 0.15 R = 0.15 beta = 40		I = 0.15 R = 0.2 beta = 10		I = 0.15 R = 0.2 beta = 20	
0.298749	0.176327	0.229979	0.0436609	0.227822	0.0874887
0.35121	0.176327	0.25986	21.6319	0.25711	9.26035
0.35121	1.01543	0.271624	0.0436609	0.268621	0.0874887
0.374021	137.002	0.285108	118.907	0.283444	26.276
0.386171	0.176327	0.291454	0.0436609	0.288117	0.0874887
0.426022	1.01543	0.314312	21.6319	0.310297	9.26035
0.460056	137.002	0.341171	21.6319	0.336609	9.26035
0.478578	1.01543	0.352016	118.907	0.349484	26.276
0.478578	0.176327	0.361741	0.0436609	0.356615	0.0874887
0.521955	137.002	0.386055	118.907	0.383223	26.276
0.629119	1.01543	0.441616	21.6319	0.434001	9.26035
0.706277	137.002	0.519849	118.907	0.514726	26.276
I = 0.15 R = 0.2 beta = 30		I = 0.15 R = 0.2 beta = 40		I = 0.15 R = 0.25 beta = 10	
0.224749	0.131653	0.221167	0.176327	0.176177	0.0436609
0.253202	4.95025	0.248665	2.83621	0.193195	22.4116
0.264358	0.131653	0.259417	0.176327	0.206493	0.0436609
0.281053	32.8256	0.278007	0.176327	0.217756	0.0436609
0.283413	0.131653	0.278236	137.002	0.221989	118.907
0.304623	4.95025	0.29808	2.83621	0.230267	22.4116
0.330205	4.95025	0.32289	2.83621	0.244361	22.4116
0.345856	32.8256	0.341255	0.176327	0.26603	0.0436609
0.349436	0.131653	0.3416	137.002	0.272376	118.907
0.379213	32.8256	0.374584	137.002	0.29232	118.907
0.423415	4.95025	0.411461	2.83621	0.306845	22.4116
0.507518	32.8256	0.499261	137.002	0.386461	118.907

I = 0.15 R = 0.25 betta = 20		I = 0.15 R = 0.25 betta = 30		I = 0.15 R = 0.25 betta = 40	
0.175327	0.0874887	0.174003	0.131653	0.172312	0.176327
0.192174	10.4981	0.190585	6.30883	0.188558	4.12074
0.205327	0.0874887	0.203514	0.131653	0.201204	0.176327
0.216526	0.0874887	0.214622	0.131653	0.21221	0.176327
0.221313	26.276	0.220256	32.8256	0.218896	137.002
0.228818	10.4981	0.226568	6.30883	0.22371	4.12074
0.242814	10.4981	0.240423	6.30883	0.2374	4.12074
0.264198	0.0874887	0.261369	0.131653	0.2578	0.176327
0.27136	26.276	0.269772	32.8256	0.267735	137.002
0.291271	26.276	0.289645	32.8256	0.287582	137.002
0.30441	10.4981	0.30066	6.30883	0.295948	4.12074
0.384631	26.276	0.3818	32.8256	0.378224	137.002
I = 0.2 R = 0.05 betta = 10		I = 0.2 R = 0.05 betta = 20		I = 0.2 R = 0.05 betta = 30	
0.499578	0.0436609	0.498323	0.0874887	0.49627	0.131653
0.544952	0.0436609	0.54346	0.0874887	0.541019	0.131653
0.666198	0.0436609	0.664815	0.0874887	0.662579	0.131653
0.749051	22.9378	0.746234	11.4985	0.741639	7.69944
0.749407	0.0436609	0.747657	0.0874887	0.744831	0.131653
0.749525	158.543	0.748112	35.0347	0.745796	43.7674
0.855903	22.9378	0.852227	11.4985	0.84624	7.69944
0.856522	158.543	0.854678	35.0347	0.851657	43.7674
1.19848	22.9378	1.19401	11.4985	1.18682	7.69944
1.1997	158.543	1.19883	35.0347	1.1975	43.7674
1.49763	22.9378	1.49066	11.4985	1.47946	7.69944
1.49953	158.543	1.49817	35.0347	1.4961	43.7674
I = 0.2 R = 0.05 betta = 40		I = 0.2 R = 0.1 betta = 10		I = 0.2 R = 0.1 betta = 20	
0.493473	0.176327	0.374291	0.0436609	0.372214	0.0874887
0.537696	0.176327	0.427645	0.0436609	0.424937	0.0874887
0.659592	0.176327	0.49874	22.8614	0.49506	11.3527
0.735409	5.81143	0.498898	0.0436609	0.495686	0.0874887
0.741057	0.176327	0.499369	158.543	0.497518	35.0347
0.742633	182.669	0.598186	22.8614	0.5929	11.3527
0.838139	5.81143	0.598413	0.0436609	0.593799	0.0874887
0.847534	182.669	0.599092	158.543	0.596429	35.0347
1.17727	5.81143	0.747522	22.8614	0.740335	11.3527
1.19589	182.669	0.748937	158.543	0.745845	35.0347
1.46465	5.81143	0.9956	22.8614	0.982892	11.3527
1.49359	182.669	0.998112	158.543	0.992627	35.0347
I = 0.2 R = 0.1 betta = 30		I = 0.2 R = 0.1 betta = 40		I = 0.2 R = 0.15 betta = 10	
0.368915	0.131653	0.364599	0.176327	0.298666	0.0436609
0.420643	0.131653	0.415041	0.176327	0.351096	0.0436609
0.489241	7.49617	0.481679	5.56524	0.372918	22.217
0.490628	0.131653	0.484096	0.176327	0.373956	158.543
0.494562	43.7674	0.490669	182.669	0.397732	0.0436609
0.584574	7.49617	0.57381	5.56524	0.458389	22.217
0.586555	0.131653	0.577243	0.176327	0.459958	158.543
0.592186	43.7674	0.586613	182.669	0.496462	0.0436609
0.729109	7.49617	0.714776	5.56524	0.541247	22.217
0.74099	43.7674	0.734751	182.669	0.543436	158.543
0.963202	7.49617	0.938345	5.56524	0.742067	22.217
0.984046	43.7674	0.973074	182.669	0.746189	158.543

I = 0.2 R = 0.15 betta = 20		I = 0.2 R = 0.15 betta = 30		I = 0.2 R = 0.15 betta = 40	
0.295038	0.0874887	0.289904	0.131653	0.283972	0.176327
0.346094	0.0874887	0.33905	0.131653	0.330965	0.176327
0.367279	10.3089	0.359357	6.31731	0.350287	4.41417
0.3711	35.0347	0.367012	43.7674	0.362222	182.669
0.391619	0.0874887	0.383097	0.131653	0.373445	0.176327
0.449899	10.3089	0.438068	6.31731	0.424664	4.41417
0.455644	35.0347	0.449497	43.7674	0.442334	182.669
0.486972	0.0874887	0.473865	0.131653	0.459185	0.176327
0.529987	10.3089	0.514499	6.31731	0.497239	4.41417
0.537979	35.0347	0.530336	43.7674	0.521638	182.669
0.721065	10.3089	0.692694	6.31731	0.661767	4.41417
0.735938	35.0347	0.72171	43.7674	0.705697	182.669
I = 0.2 R = 0.2 betta = 10		I = 0.2 R = 0.2 betta = 20		I = 0.2 R = 0.2 betta = 30	
0.242936	0.0436609	0.236272	0.0874887	0.229987	0.131653
0.289884	1.00096	0.280446	1.00382	0.271636	1.00863
0.289884	0.0436609	0.280446	0.0874887	0.271636	0.131653
0.294855	158.543	0.289894	35.0347	0.285114	43.7674
0.320957	0.0436609	0.309611	0.0874887	0.299196	0.131653
0.359326	1.00096	0.344937	1.00382	0.331704	1.00863
0.366996	158.543	0.359341	35.0347	0.352026	43.7674
0.408327	1.00096	0.390138	0.0874887	0.373744	1.00863
0.408327	0.0436609	0.390138	1.00382	0.373744	0.131653
0.41826	158.543	0.408665	35.0347	0.399746	43.7674
0.561057	1.00096	0.527279	1.00382	0.49777	1.00863
0.579982	158.543	0.561696	35.0347	0.544982	43.7674
I = 0.2 R = 0.2 betta = 40		I = 0.2 R = 0.25 betta = 10		I = 0.2 R = 0.25 betta = 20	
0.224061	0.176327	0.186644	0.0436609	0.184412	0.0874887
0.263408	1.01543	0.213168	20.9713	0.210262	8.39361
0.263408	0.176327	0.22102	0.0436609	0.217897	0.0874887
0.280516	182.669	0.230119	158.543	0.228415	35.0347
0.289629	0.176327	0.238635	0.0436609	0.235104	0.0874887
0.319517	1.01543	0.259215	20.9713	0.25493	8.39361
0.345042	182.669	0.283782	20.9713	0.278803	8.39361
0.358933	1.01543	0.284719	158.543	0.282115	35.0347
0.358933	0.176327	0.29787	0.0436609	0.292389	0.0874887
0.391466	182.669	0.314637	158.543	0.311646	35.0347
0.471839	1.01543	0.371678	20.9713	0.363183	8.39361
0.529708	182.669	0.426451	158.543	0.420975	35.0347
I = 0.2 R = 0.25 betta = 30		I = 0.2 R = 0.25 betta = 40		I = 0.25 R = 0.05 betta = 10	
0.181409	0.131653	0.178071	0.176327	0.428281	0.0436609
0.206367	4.17051	0.202058	2.21105	0.461201	0.0436609
0.213718	0.131653	0.209099	0.176327	0.571171	0.0436609
0.226098	43.7674	0.223487	182.669	0.631264	0.0436609
0.230417	0.131653	0.22529	0.176327	0.665963	22.942
0.249228	4.17051	0.242969	2.21105	0.666315	198.179
0.272236	4.17051	0.265108	2.21105	0.74911	22.942
0.278588	43.7674	0.274634	182.669	0.749555	198.179
0.285175	0.131653	0.277363	0.176327	1.08997	22.942
0.307652	43.7674	0.303259	182.669	1.09091	198.179
0.352118	4.17051	0.340285	2.21105	1.33193	22.942
0.413721	43.7674	0.405815	182.669	1.33334	198.179

I = 0.25 R = 0.05 betta = 20		I = 0.25 R = 0.05 betta = 30		I = 0.25 R = 0.05 betta = 40	
0.427415	0.0874887	0.425993	0.131653	0.424047	0.176327
0.460197	0.0874887	0.45855	0.131653	0.456296	0.176327
0.57041	0.0874887	0.569184	0.131653	0.567556	0.176327
0.630335	0.0874887	0.628838	0.131653	0.626851	0.176327
0.663872	11.5068	0.660448	7.71155	0.655783	5.82697
0.665266	43.7933	0.663543	54.7093	0.66118	228.336
0.746464	11.5068	0.742139	7.71155	0.736253	5.82697
0.748228	43.7933	0.746049	54.7093	0.743063	228.336
1.0872	11.5068	1.08276	7.71155	1.07688	5.82697
1.09095	43.7933	1.0911	54.7093	1.09151	228.336
1.3278	11.5068	1.32118	7.71155	1.31244	5.82697
1.33339	43.7933	1.33362	54.7093	1.33424	228.336
I = 0.25 R = 0.1 betta = 10		I = 0.25 R = 0.1 betta = 20		I = 0.25 R = 0.1 betta = 30	
0.332865	0.0436609	0.331484	0.0874887	0.329254	0.131653
0.374408	0.0436609	0.372661	0.0874887	0.369845	0.131653
0.443769	0.0436609	0.441784	0.0874887	0.438607	0.131653
0.460641	22.909	0.458	11.4426	0.453754	7.61972
0.46109	198.179	0.459762	43.7933	0.457613	54.7093
0.520808	0.0436609	0.518076	0.0874887	0.513712	0.131653
0.544202	22.909	0.540519	11.4426	0.534616	7.61972
0.544828	198.179	0.542976	43.7933	0.539981	54.7093
0.70418	22.909	0.699194	11.4426	0.691269	7.61972
0.705227	198.179	0.70331	43.7933	0.700266	54.7093
0.920168	22.909	0.911673	11.4426	0.898246	7.61972
0.921957	198.179	0.918683	43.7933	0.913495	54.7093
I = 0.25 R = 0.1 betta = 40		I = 0.25 R = 0.15 betta = 10		I = 0.25 R = 0.15 betta = 20	
0.326275	0.176327	0.272026	0.0436609	0.270006	0.0874887
0.36609	0.176327	0.31485	0.0436609	0.312147	0.0874887
0.434415	0.176327	0.351768	22.756	0.348397	11.1613
0.448115	5.71199	0.352354	198.179	0.350654	43.7933
0.454728	228.336	0.362496	0.0436609	0.359225	0.0874887
0.507972	0.176327	0.426843	22.756	0.421889	11.1613
0.526805	5.71199	0.427706	198.179	0.425204	43.7933
0.535968	228.336	0.442742	0.0436609	0.437873	0.0874887
0.680914	5.71199	0.519395	22.756	0.512706	11.1613
0.6963	228.336	0.520672	198.179	0.51761	43.7933
0.880839	5.71199	0.701597	22.756	0.689449	11.1613
0.906758	228.336	0.70393	198.179	0.698346	43.7933
I = 0.25 R = 0.15 betta = 30		I = 0.25 R = 0.15 betta = 40		I = 0.25 R = 0.2 betta = 10	
0.266879	0.131653	0.262922	0.176327	0.229473	0.0436609
0.307976	0.131653	0.302717	0.176327	0.270919	0.0436609
0.343209	7.24877	0.336692	5.29127	0.283731	21.7034
0.348007	54.7093	0.344625	228.336	0.284719	198.179
0.354218	0.131653	0.347973	0.176327	0.305467	0.0436609
0.414306	7.24877	0.404846	5.29127	0.349919	21.7034
0.421318	54.7093	0.416371	228.336	0.351424	198.179
0.430455	0.131653	0.421267	0.176327	0.383581	0.0436609
0.502566	7.24877	0.490086	5.29127	0.409779	21.7034
0.512921	54.7093	0.507078	228.336	0.411843	198.179
0.671236	7.24877	0.649158	5.29127	0.563801	21.7034
0.689837	54.7093	0.679309	228.336	0.567717	198.179

I = 0.25 R = 0.2 betta = 20		I = 0.25 R = 0.2 betta = 30		I = 0.25 R = 0.2 betta = 40	
0.226109	0.0874887	0.221612	0.131653	0.21665	0.176327
0.266242	0.0874887	0.260029	0.131653	0.253224	0.176327
0.278605	9.63562	0.271808	5.71211	0.264381	3.92923
0.282115	43.7933	0.278588	54.7093	0.274634	228.336
0.299749	0.0874887	0.29224	0.131653	0.284135	0.176327
0.342155	9.63562	0.331961	5.71211	0.32095	3.92923
0.347465	43.7933	0.34213	54.7093	0.336186	228.336
0.374608	0.0874887	0.362953	0.131653	0.350534	0.176327
0.399554	9.63562	0.386323	5.71211	0.372283	3.92923
0.406812	43.7933	0.400164	54.7093	0.39294	228.336
0.544625	9.63562	0.520334	5.71211	0.495182	3.92923
0.558201	43.7933	0.545759	54.7093	0.53241	228.336
I = 0.25 R = 0.25 betta = 10		I = 0.25 R = 0.25 betta = 20		I = 0.25 R = 0.25 betta = 30	
0.194348	0.0436609	0.189017	0.0874887	0.18399	0.131653
0.231907	1.00095	0.224357	1.00382	0.217308	1.00863
0.231907	0.0436609	0.224357	0.0874887	0.217308	0.131653
0.235884	198.179	0.231915	43.7933	0.228091	54.7093
0.256766	0.0436609	0.247688	0.0874887	0.239357	0.131653
0.287461	1.00095	0.275949	1.00382	0.265363	1.00863
0.293597	198.179	0.287473	43.7933	0.281621	54.7093
0.326662	1.00095	0.31211	0.0874887	0.298995	0.131653
0.326662	0.0436609	0.31211	1.00382	0.298995	1.00863
0.334608	198.179	0.326932	43.7933	0.319797	54.7093
0.448846	1.00095	0.421823	1.00382	0.398216	1.00863
0.463986	198.179	0.449357	43.7933	0.435985	54.7093
		I = 0.25 R = 0.25 betta = 40			
		0.179249	0.176327		
		0.210726	1.01543		
		0.210726	0.176327		
		0.224412	228.336		
		0.231703	0.176327		
		0.255613	1.01543		
		0.276034	228.336		
		0.287147	0.176327		
		0.287147	1.01543		
		0.313173	228.336		
		0.377472	1.01543		
		0.423766	228.336		

### 3. CST Studio Suite

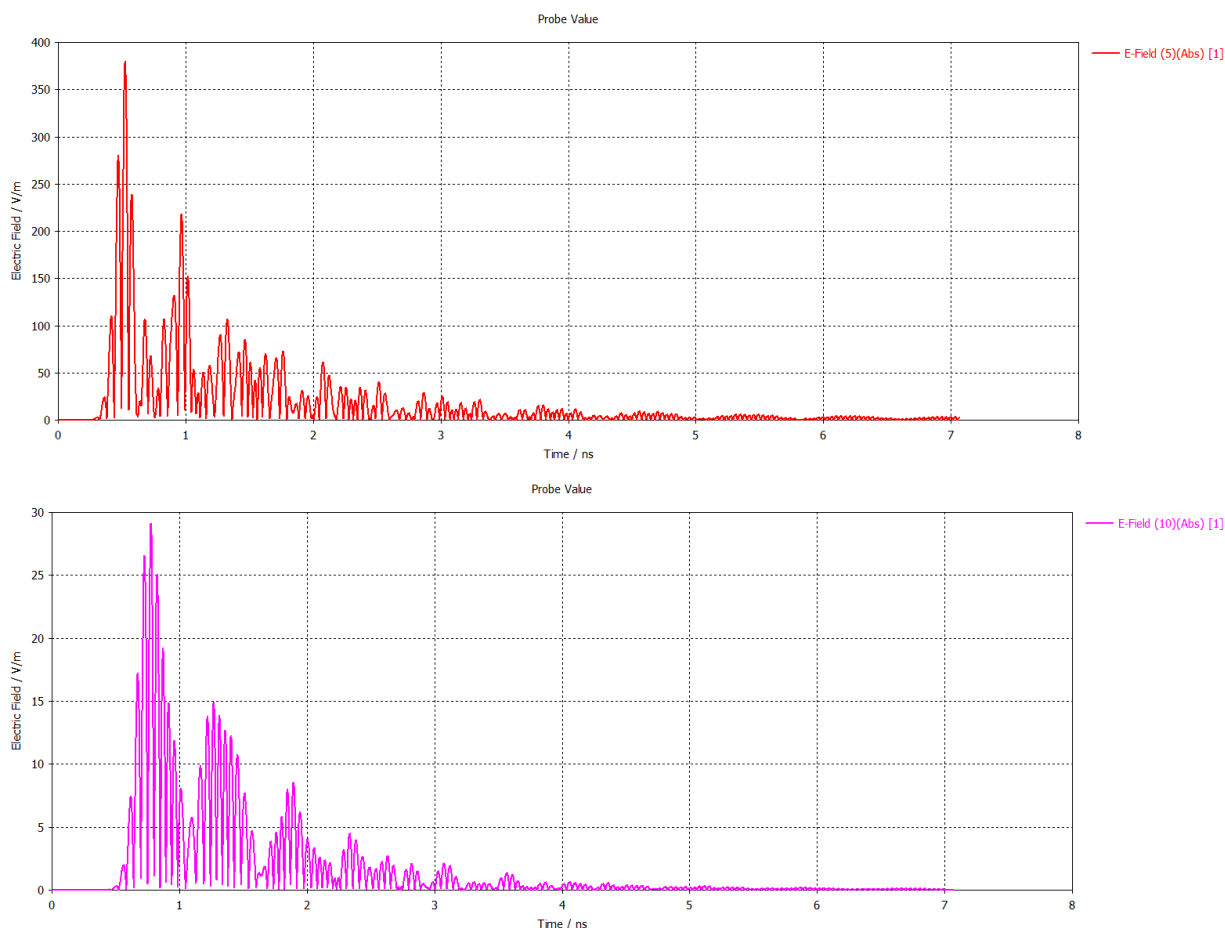
Пакет CST STUDIO SUITE представляет собой набор инструментов для проектирования, моделирования и оптимизации трехмерных электромагнитных систем, который обрёл значительную популярность благодаря относительно простому в изучении и использованию функционалу, а так же высокой точности симулируемых вычислений.

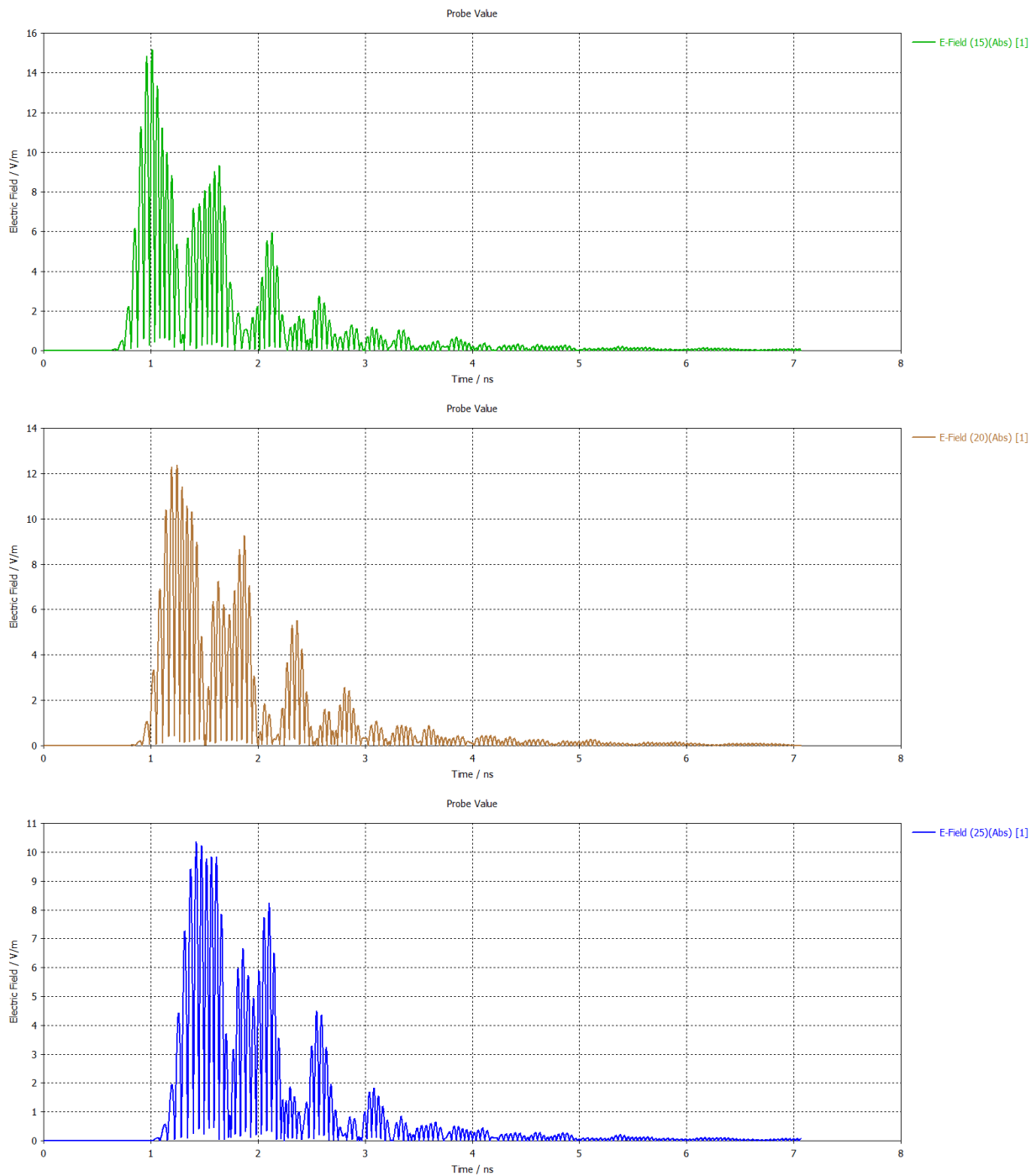
В данной работе было решено использовать данный пакет для исследования применимости зарядовой теории на примере треугольного вибратора. Не смотря на простоту примера, результаты могут подтвердить право на существование данной модели, т. к. максимальные значения электрического поля в зарядовой модели и методе конечных разностей, как утверждается в [6], не могут иметь существенные различия.

#### 3.1. Результаты моделирования треугольной антенны

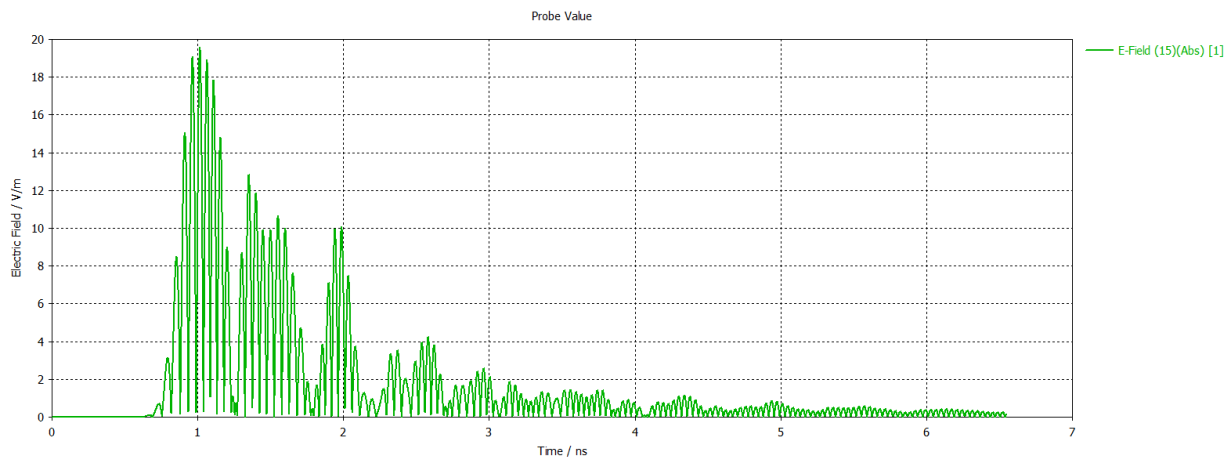
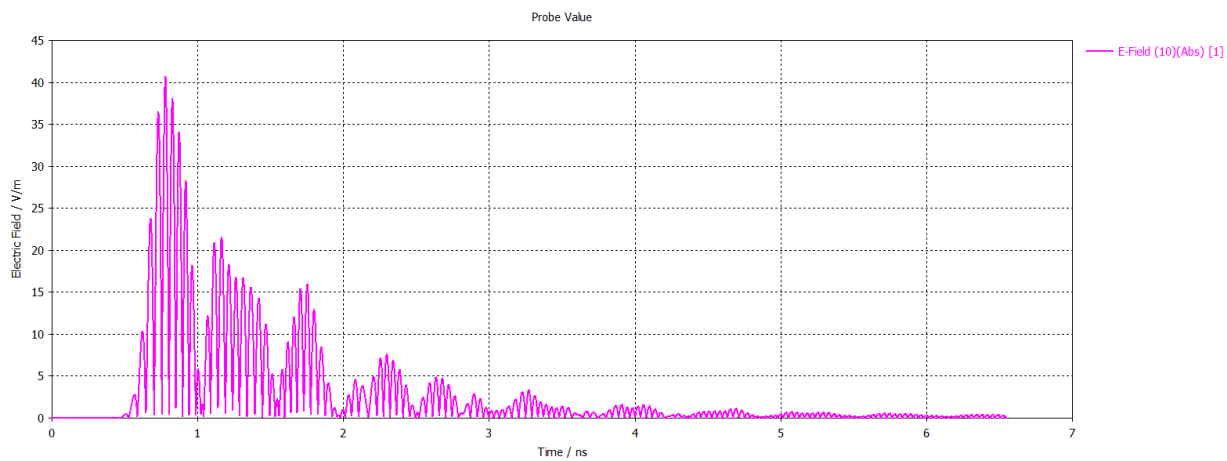
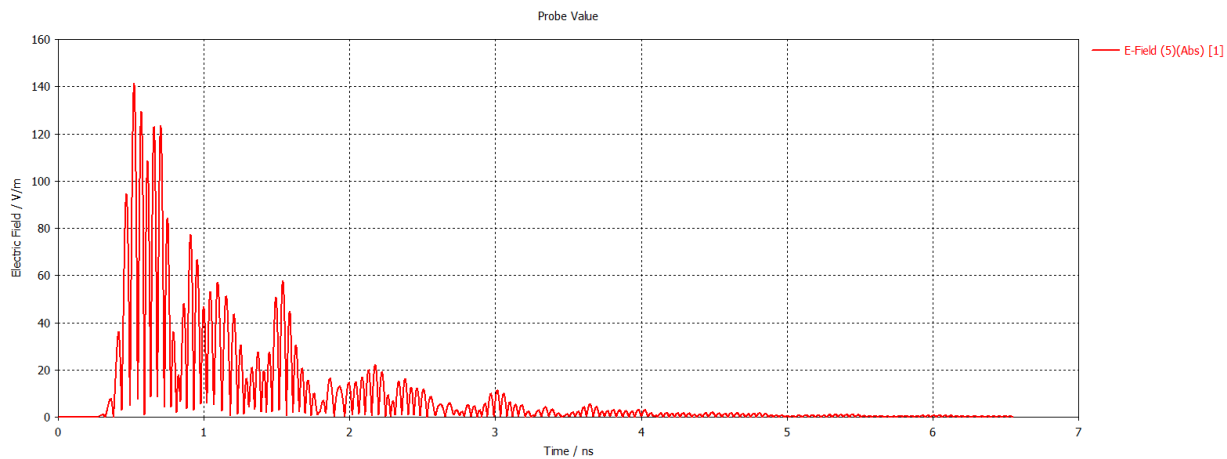
Предоставим графики вычислений с некоторыми пояснениями:

Для параметров 5, 10 (здесь и далее, первая цифра обозначает длину плеча, вторая — угол между проводниками; данные представлены в порядке увеличения расстояния до точки наблюдения (5, 10, 15, 20, 25)):

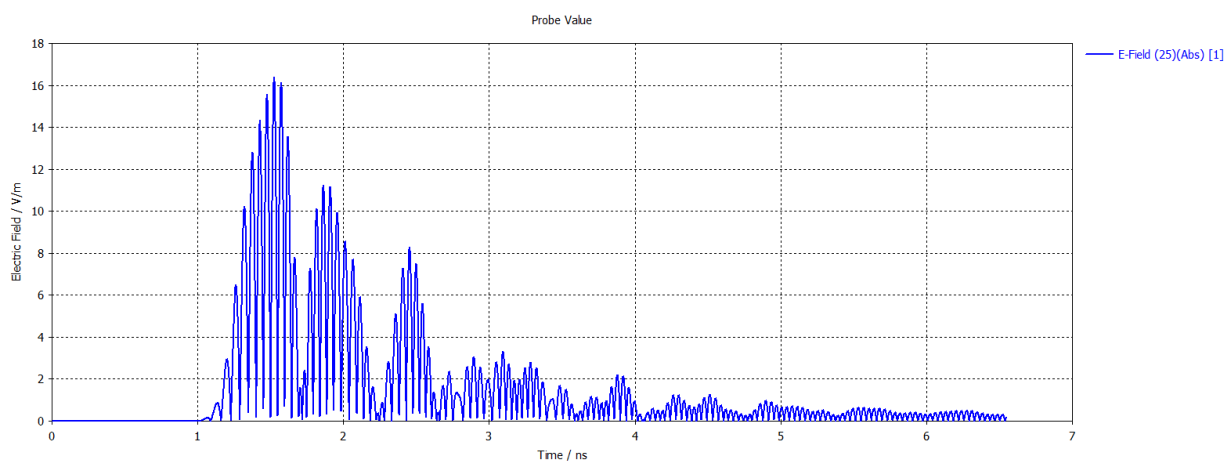
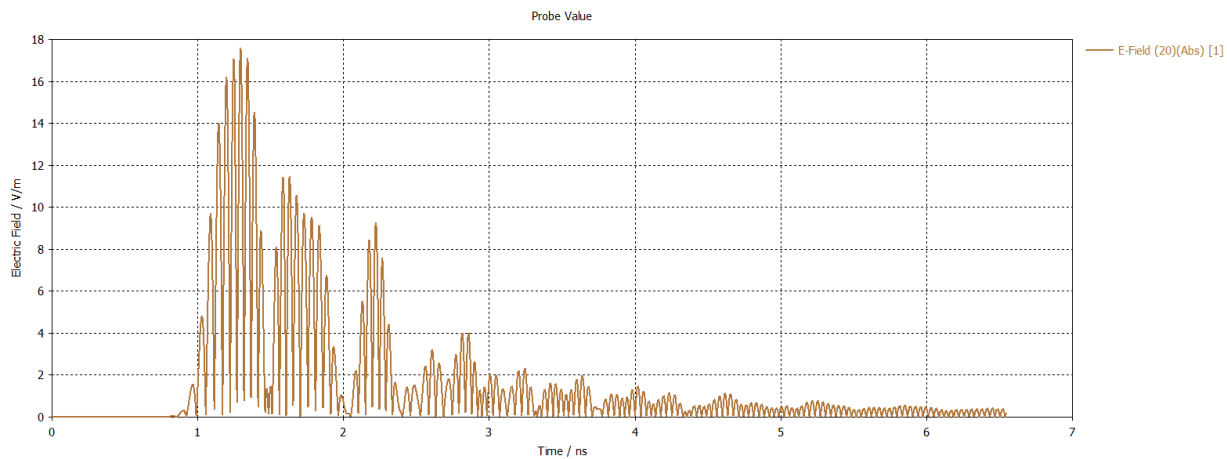




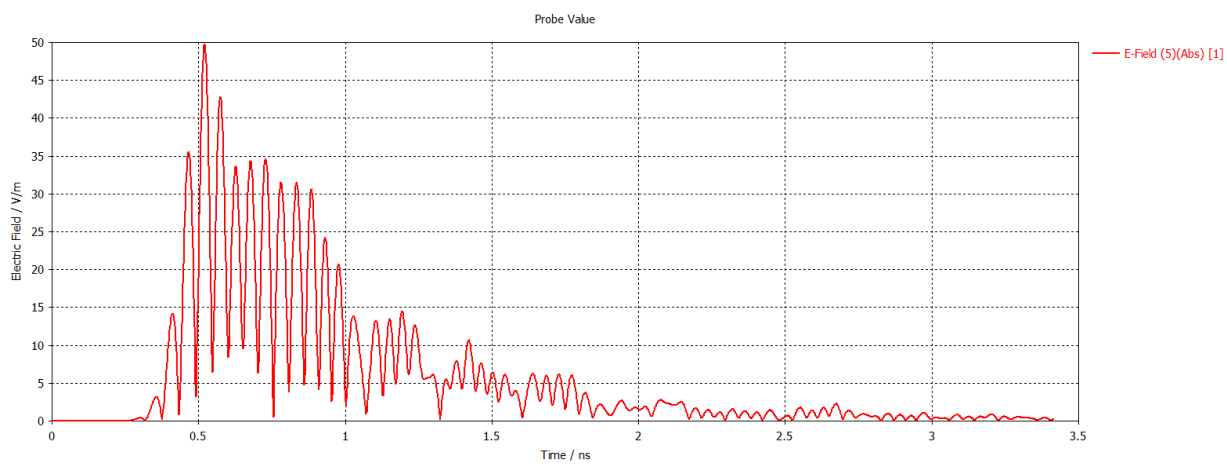
Для параметров 5, 20:

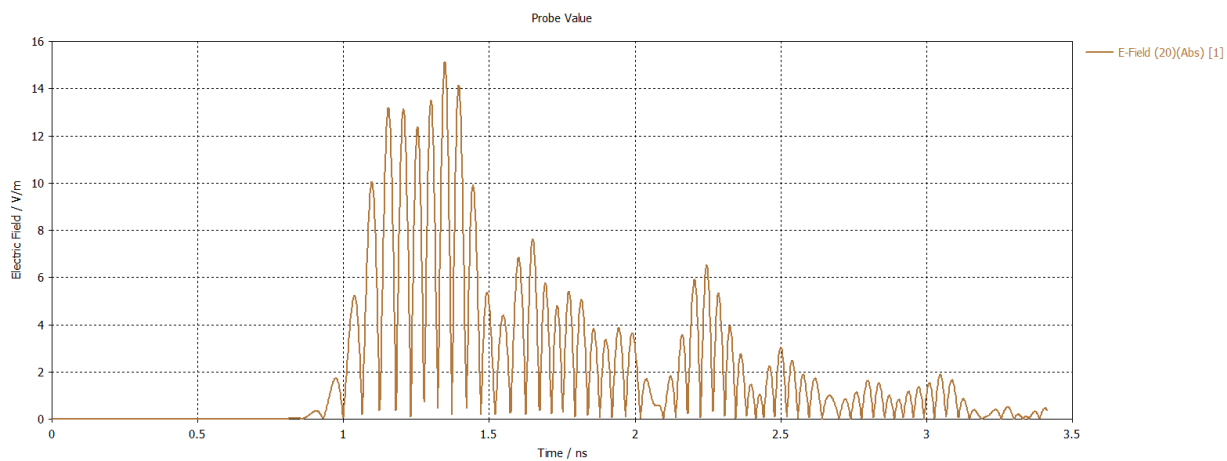
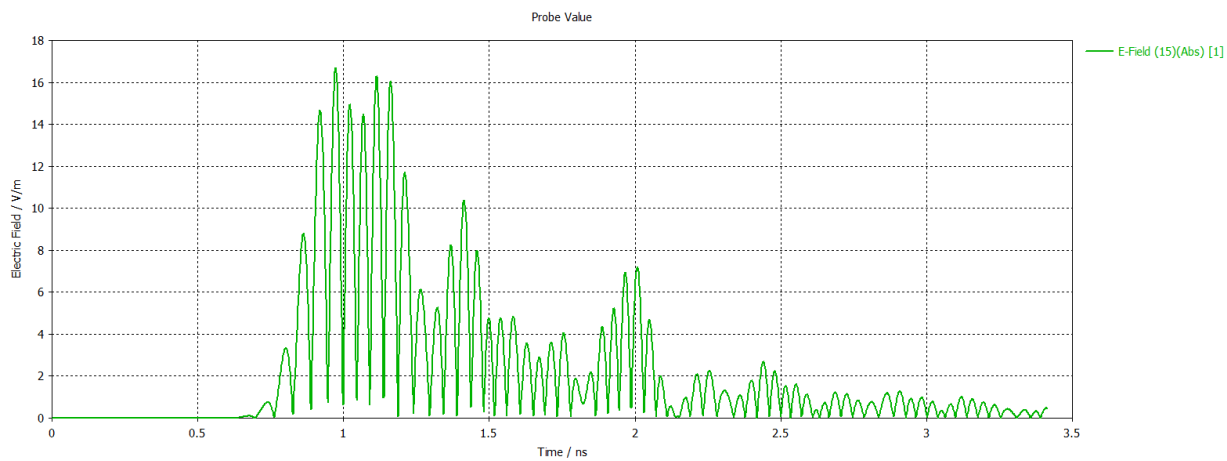
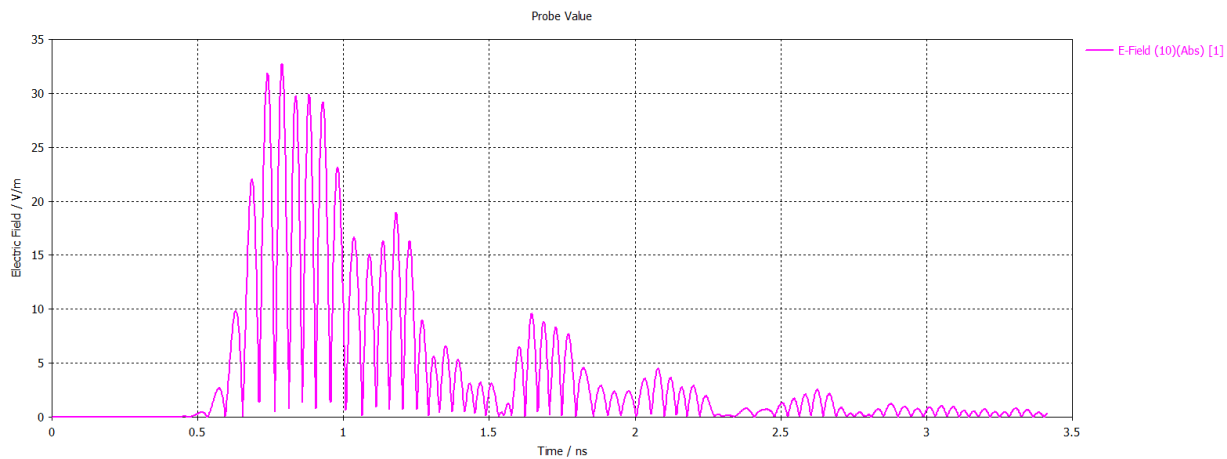


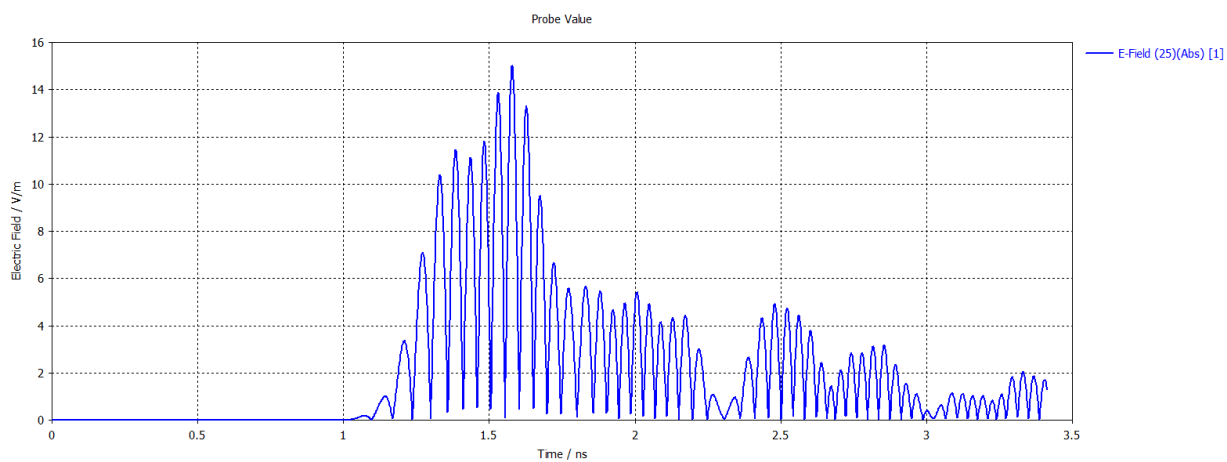




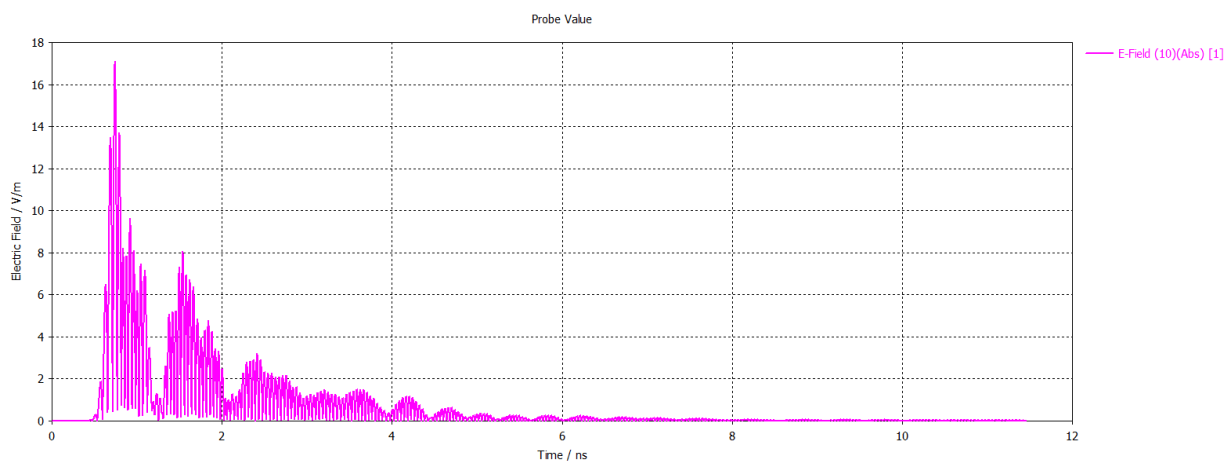
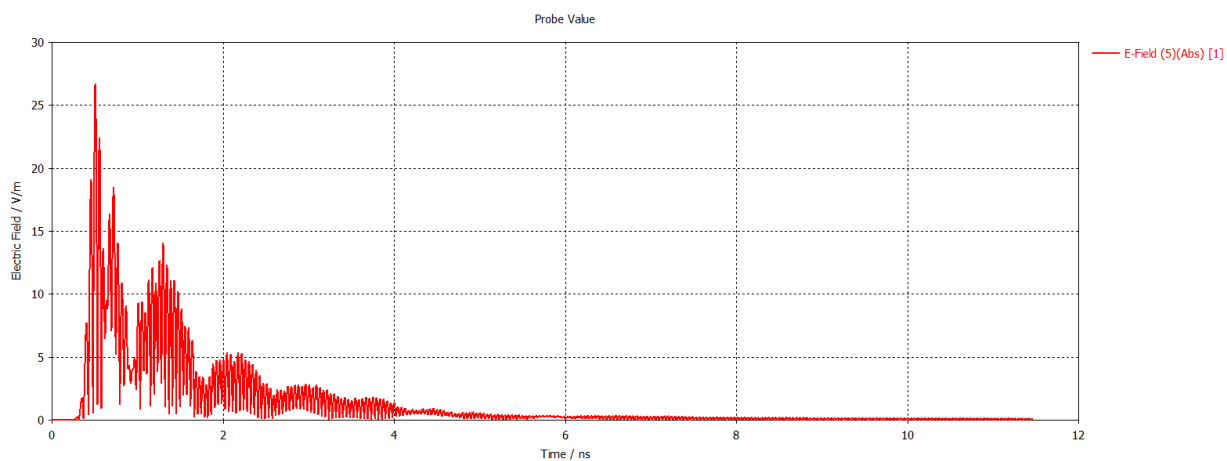
Для параметров 5, 30:

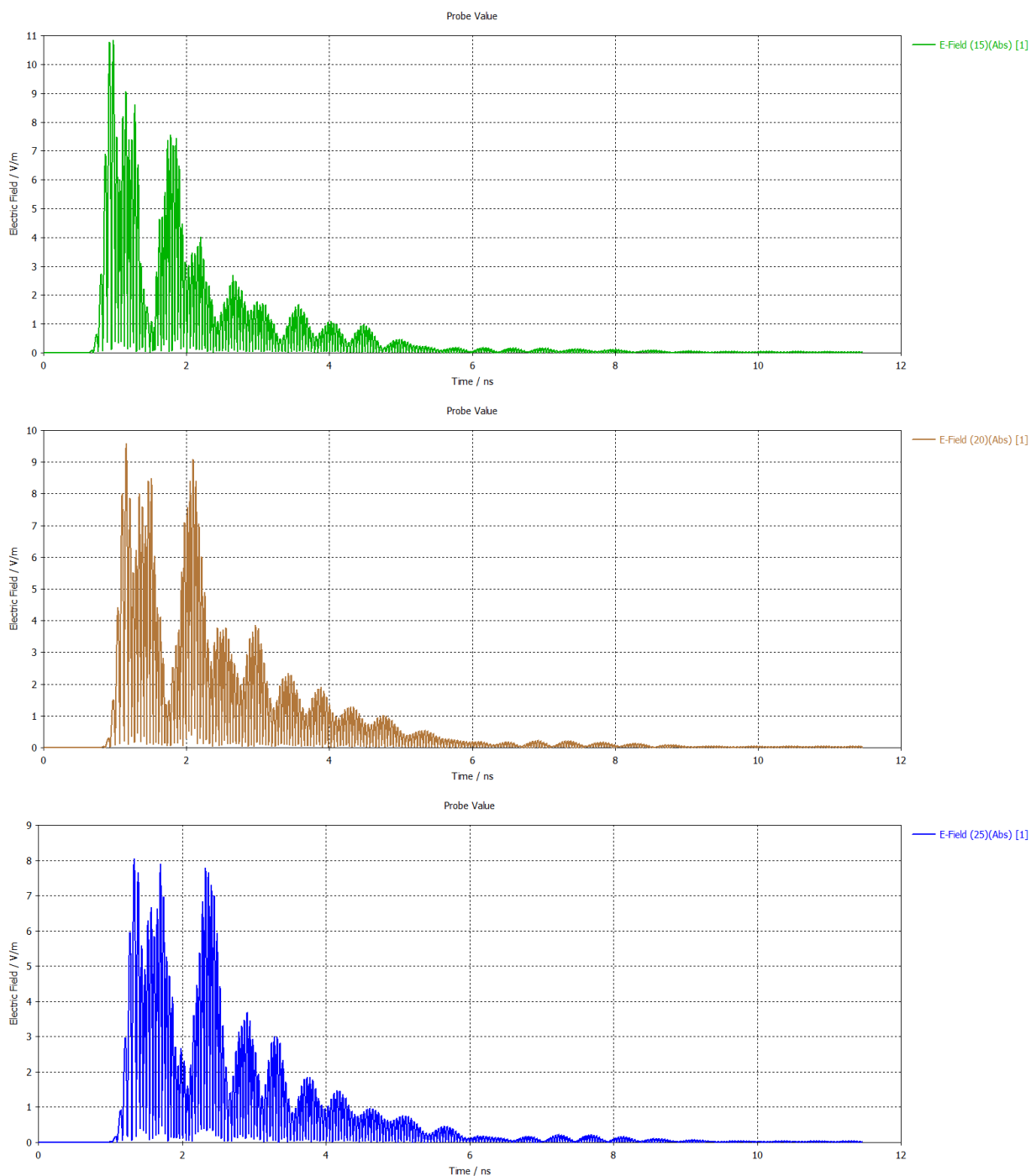






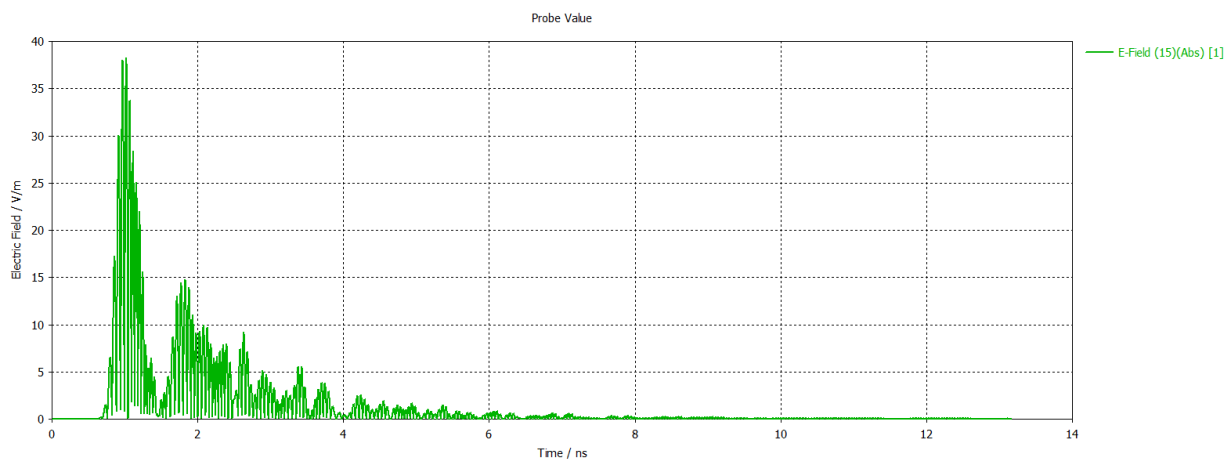
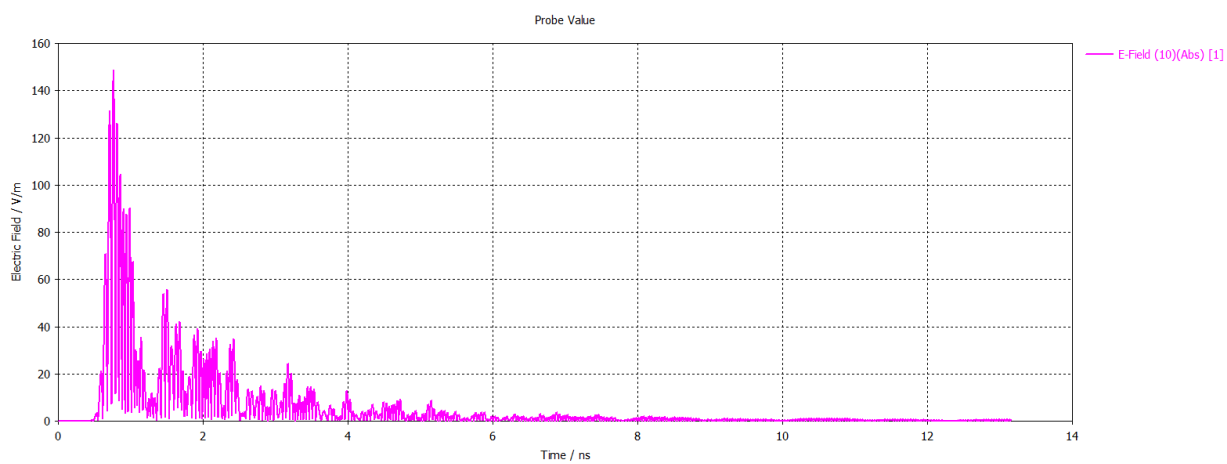
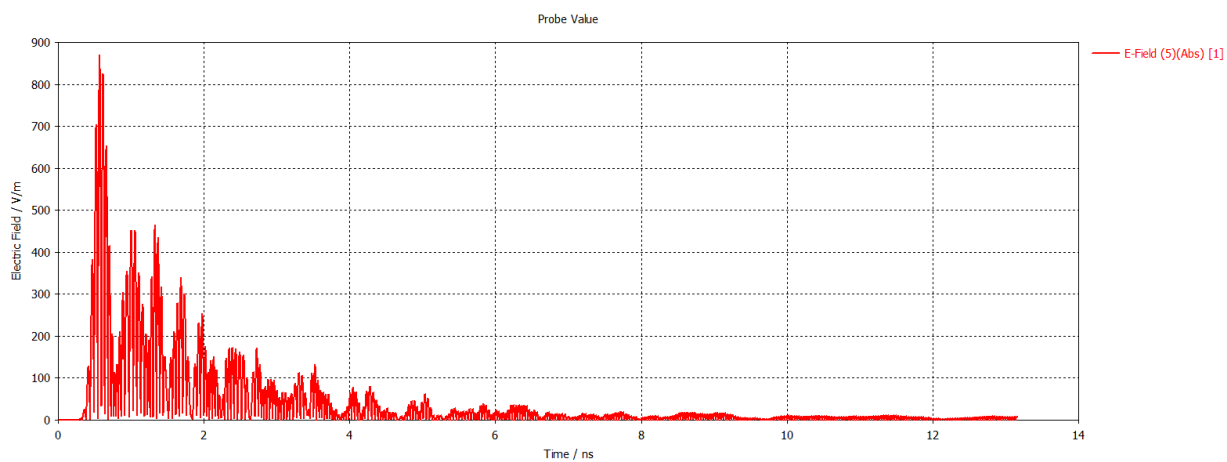
Для параметров 5, 40:

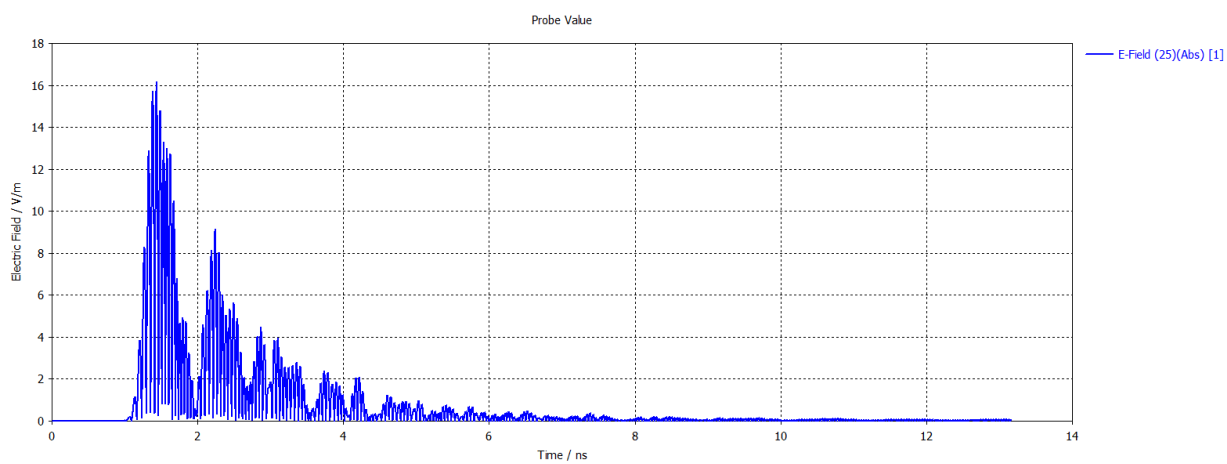
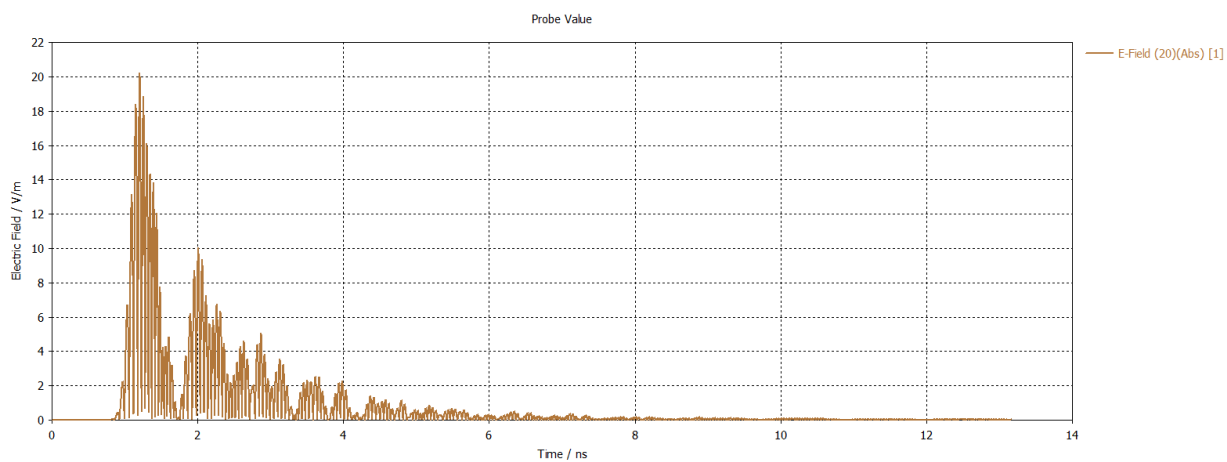




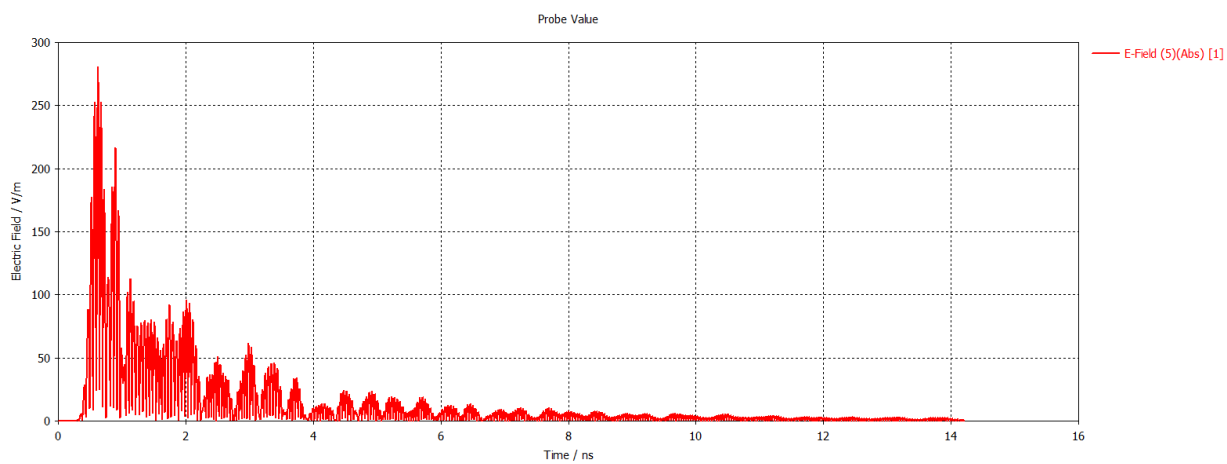
Подведём промежуточный итог: в целом, разброс данных находится в удовлетворительном диапазоне:  $\pm 10$ . Наибольшая разница заметна при малых углах и малом расстоянии от геометрического центра антенны: там расчёты из CST превышают исчисленные в 10 раз. При углах больших 30, наблюдается обратный эффект. Исчисленные результаты больше моделированных в 5 раз.

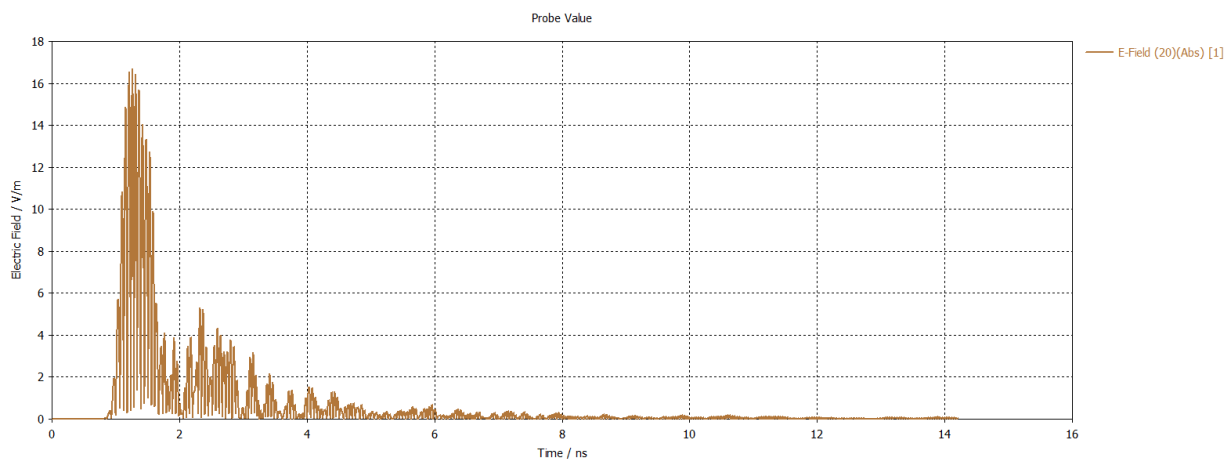
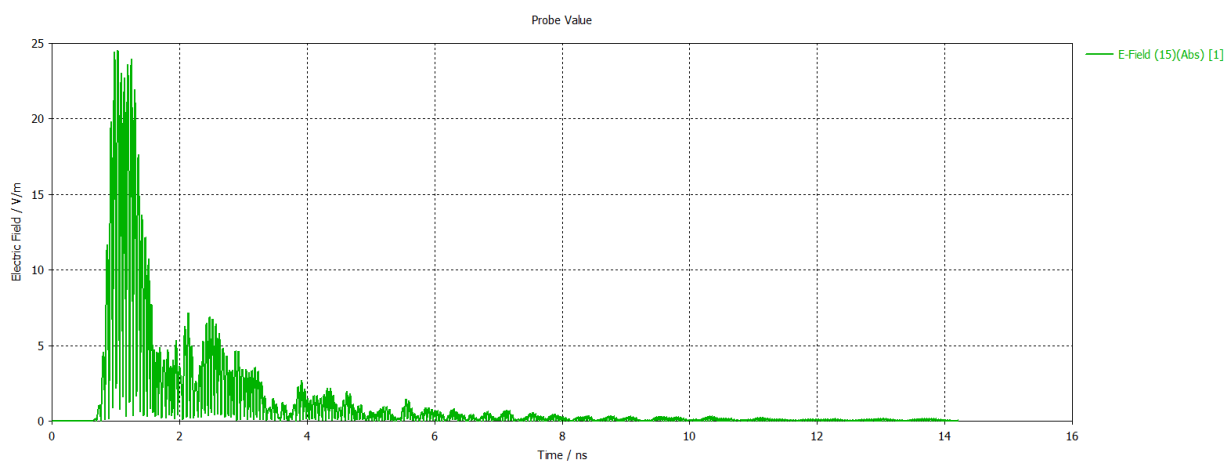
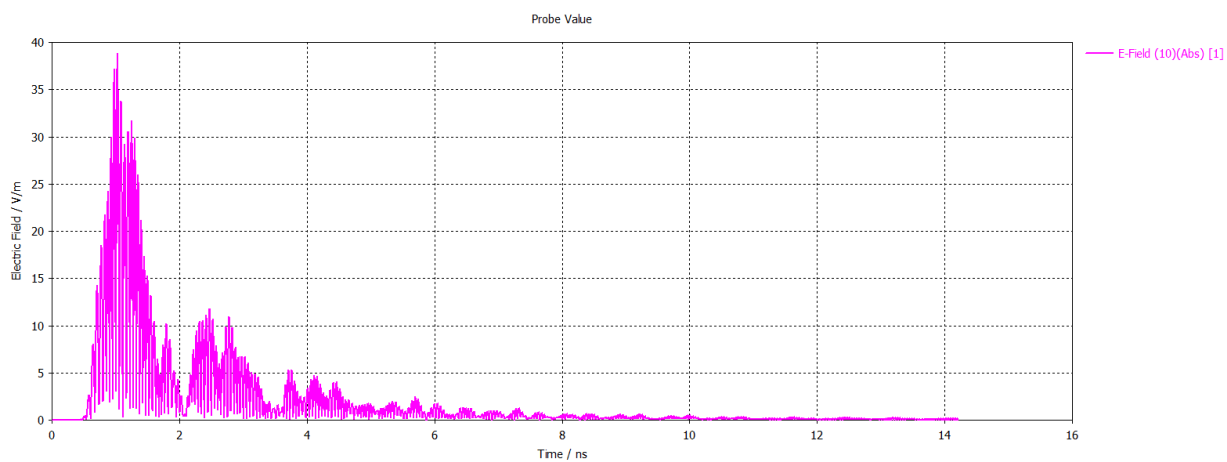
Приведем теперь графики для 10, 10:

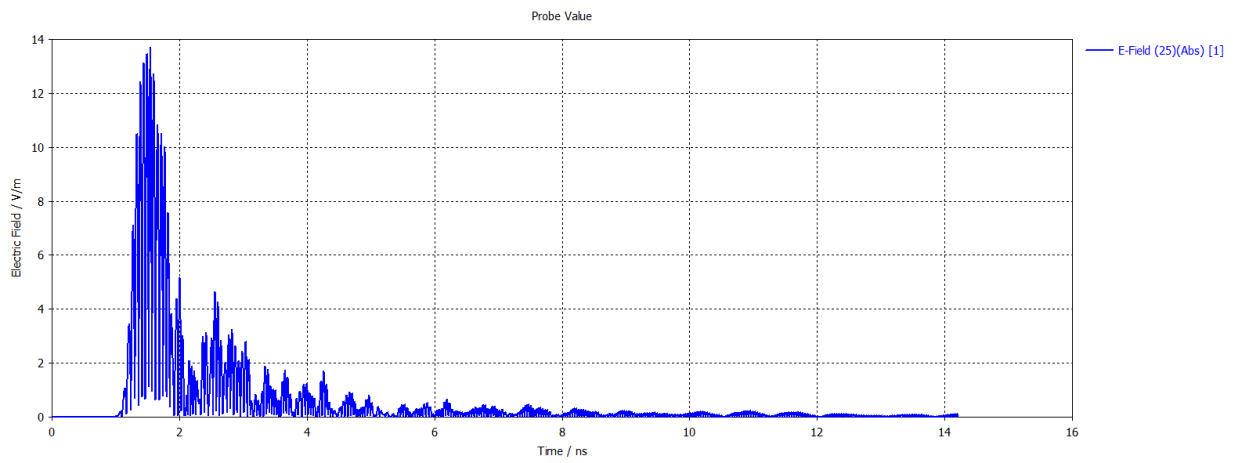




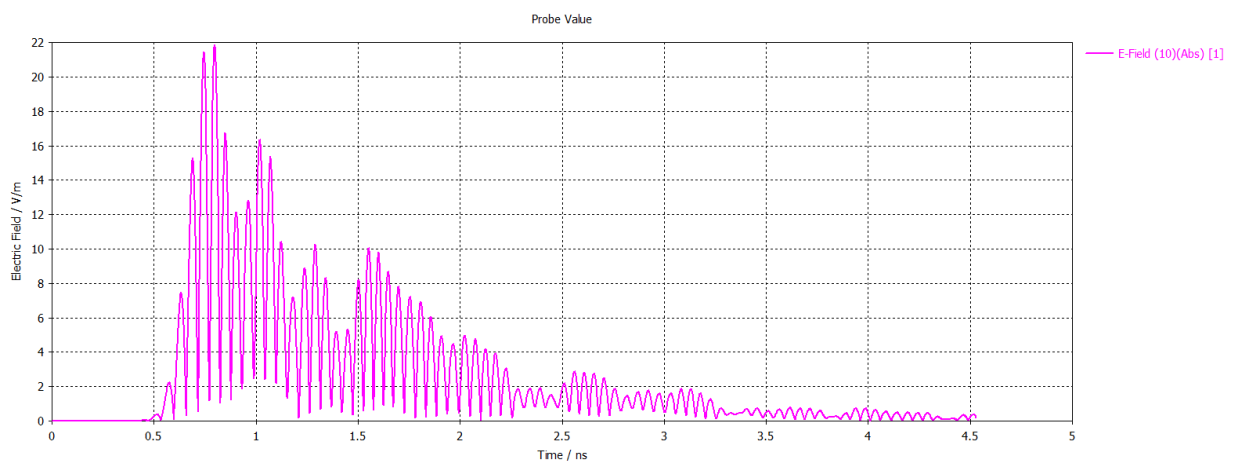
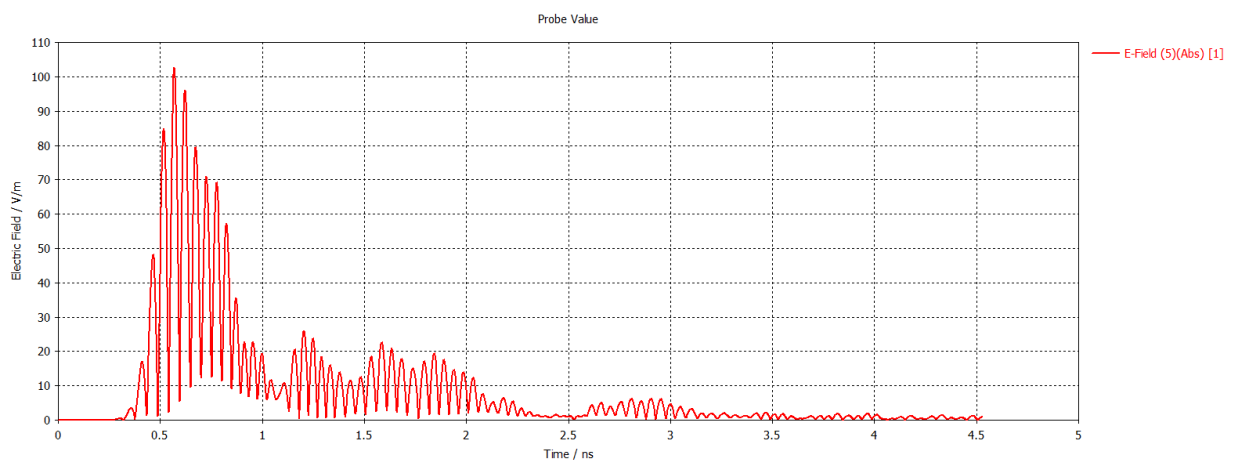
10,20



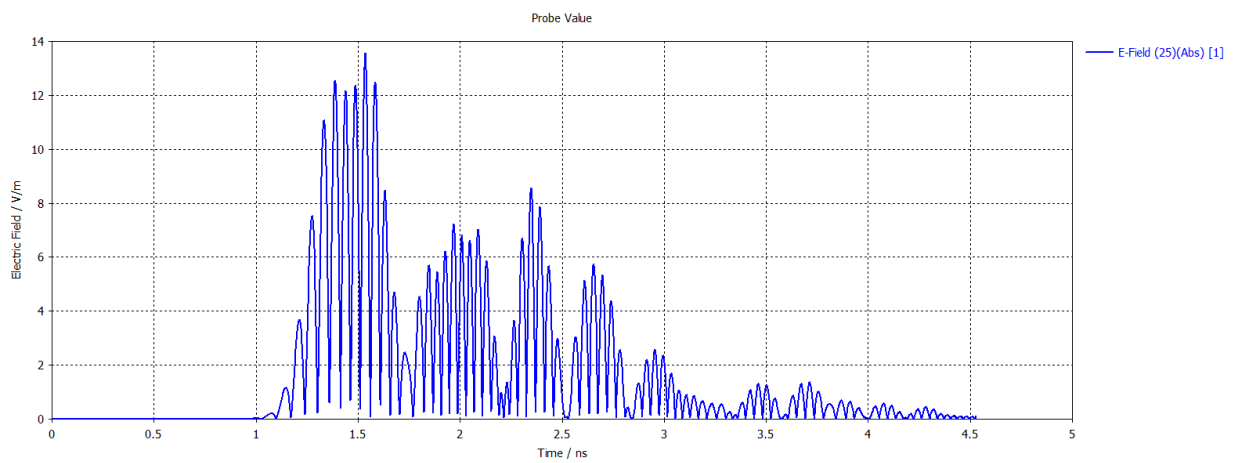
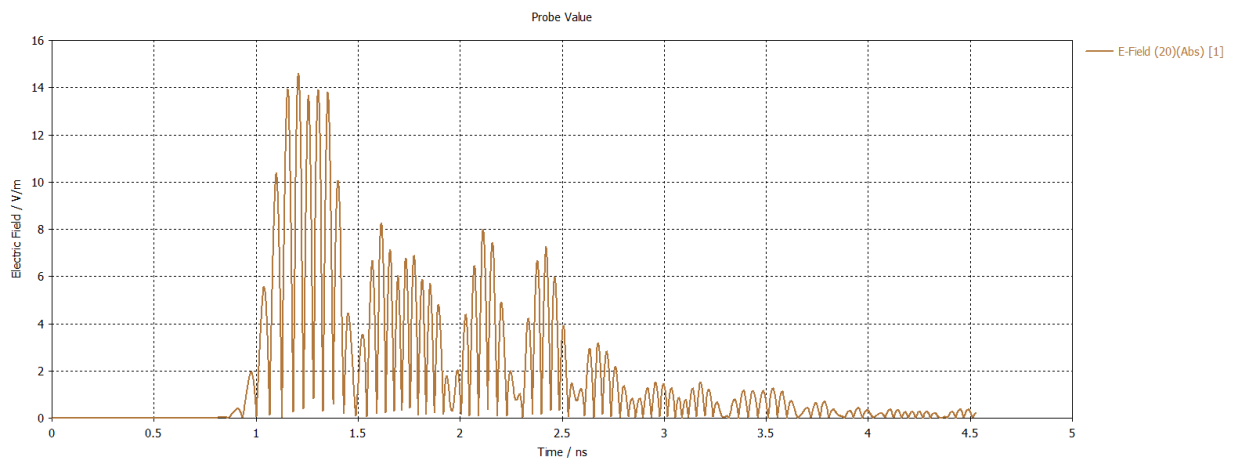
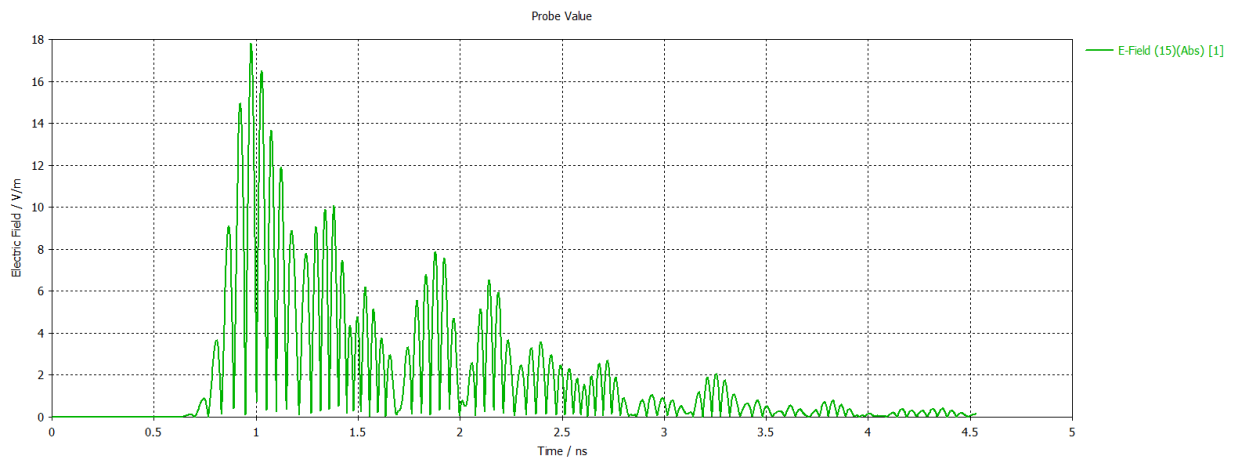




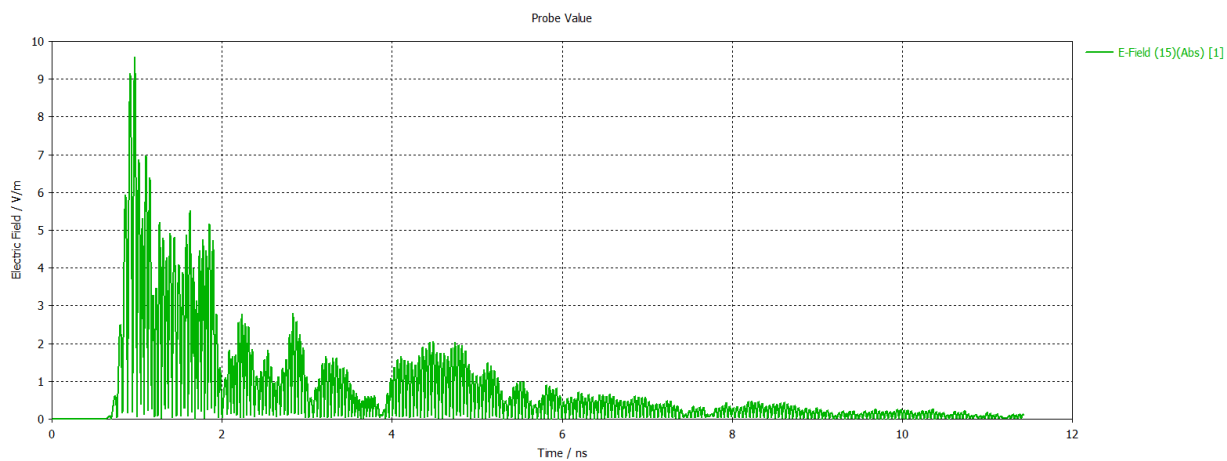
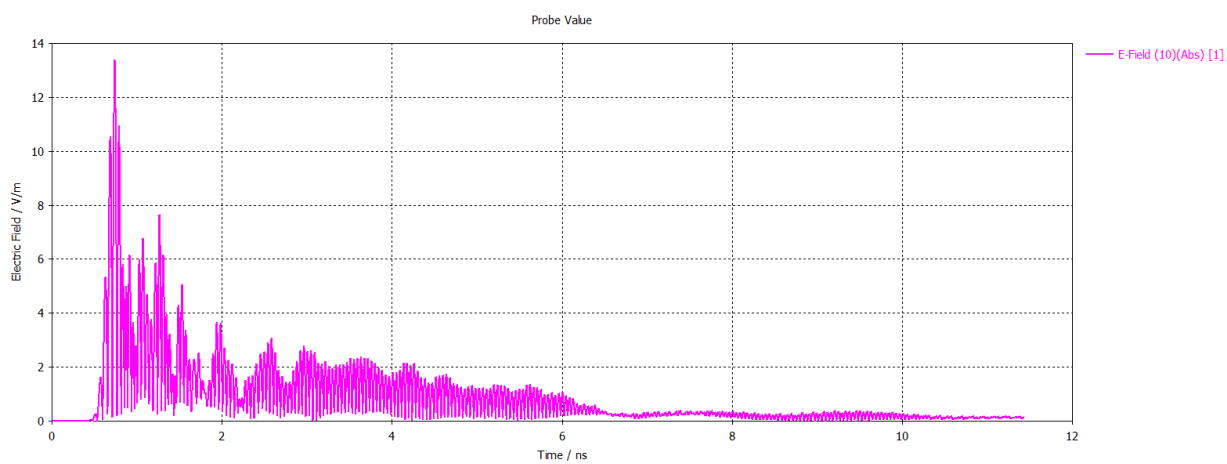
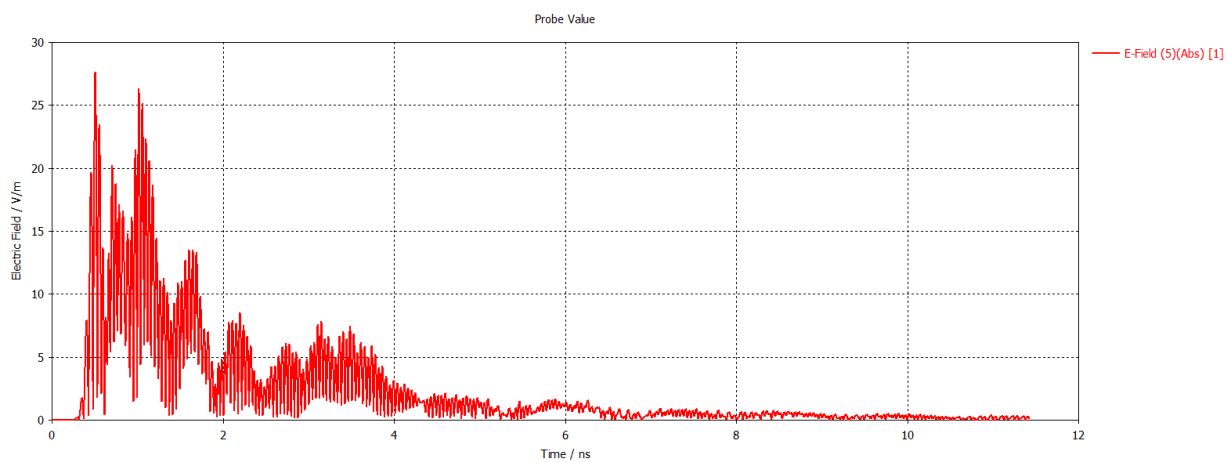
10,30

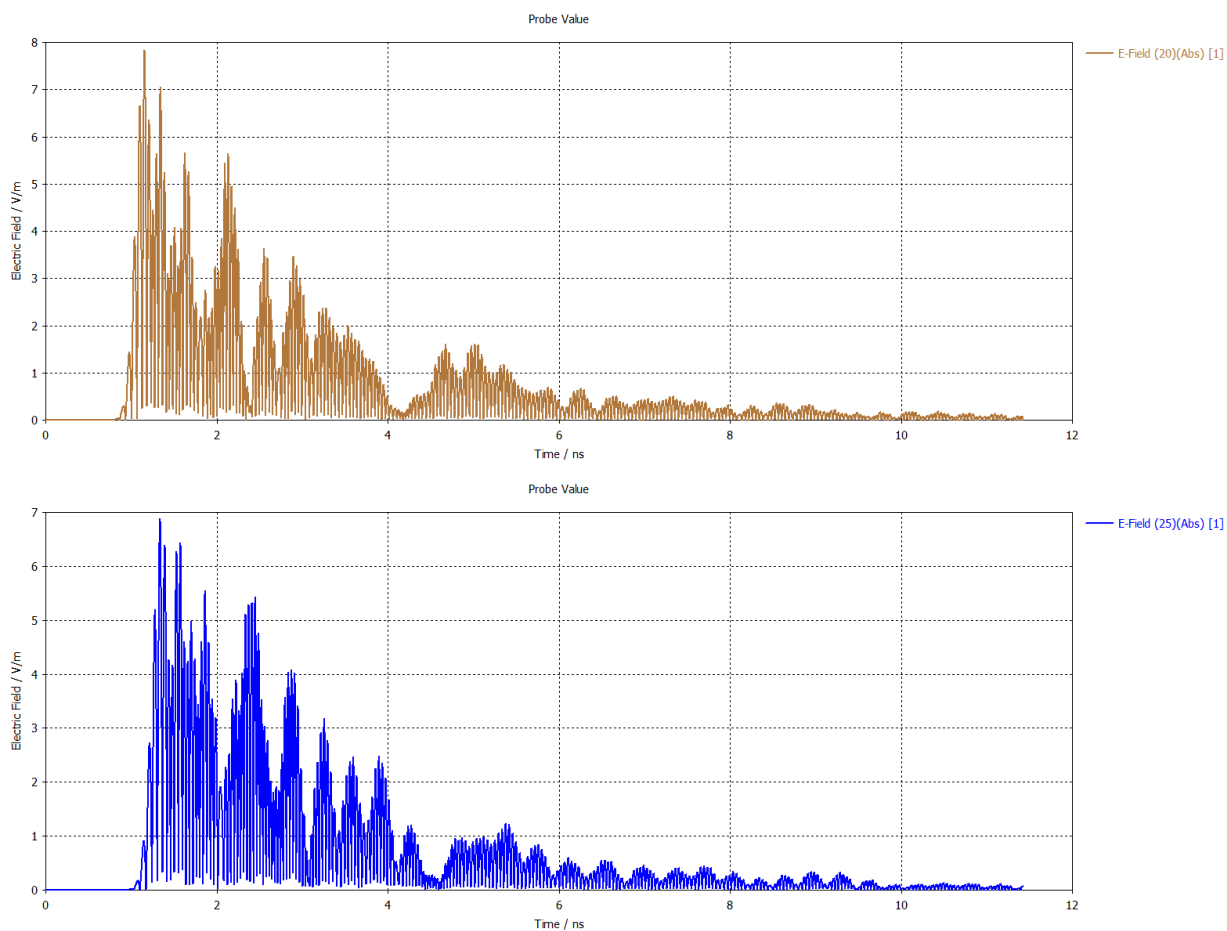






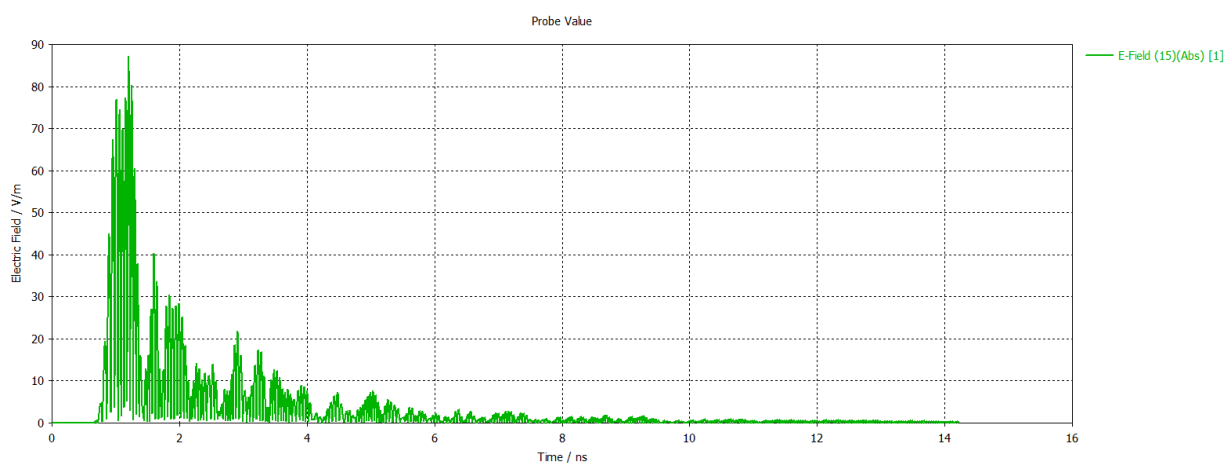
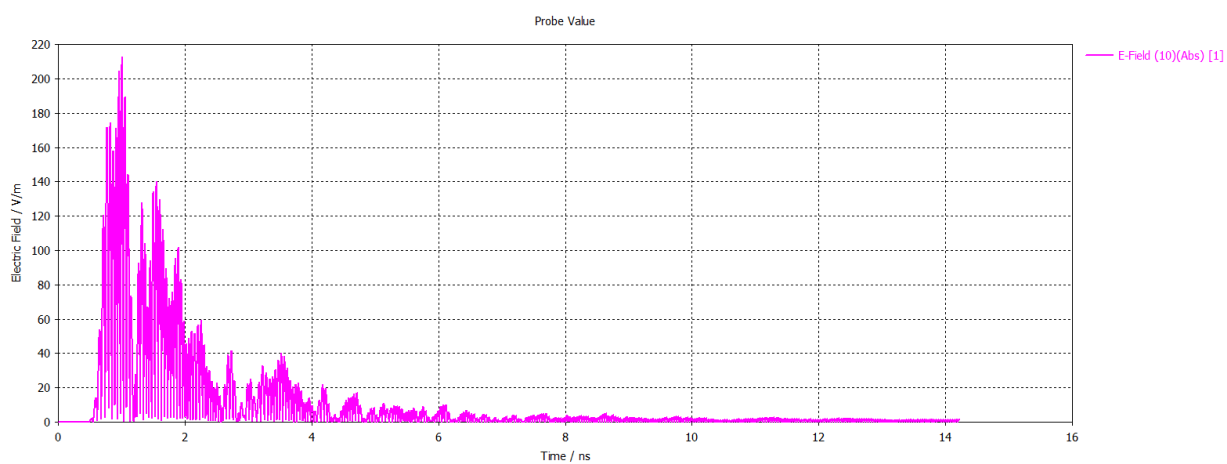
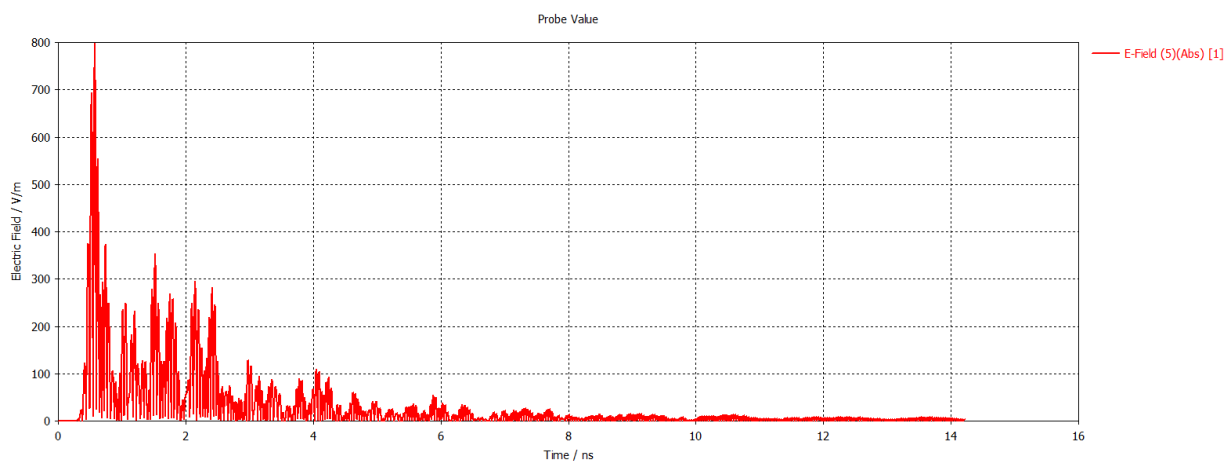
10,40

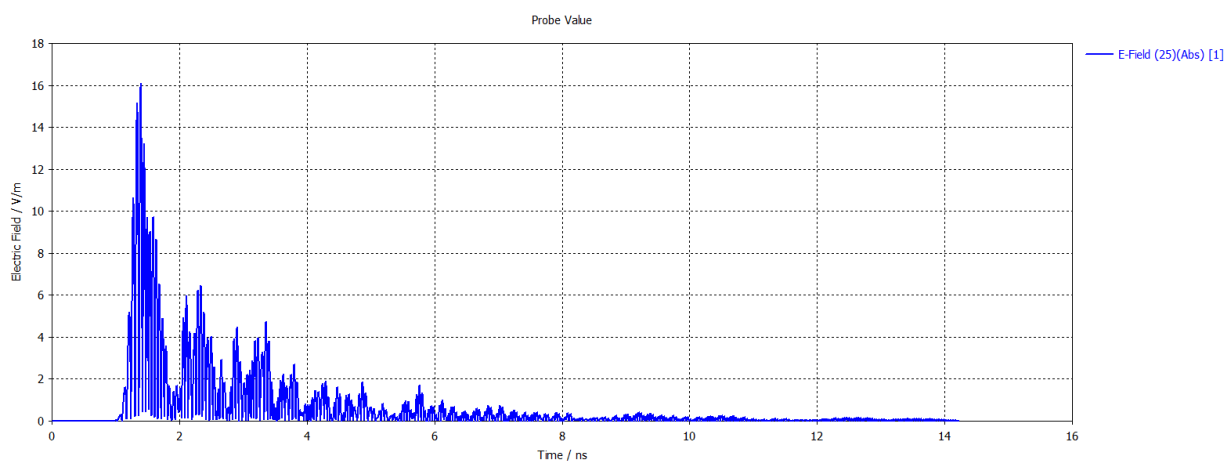
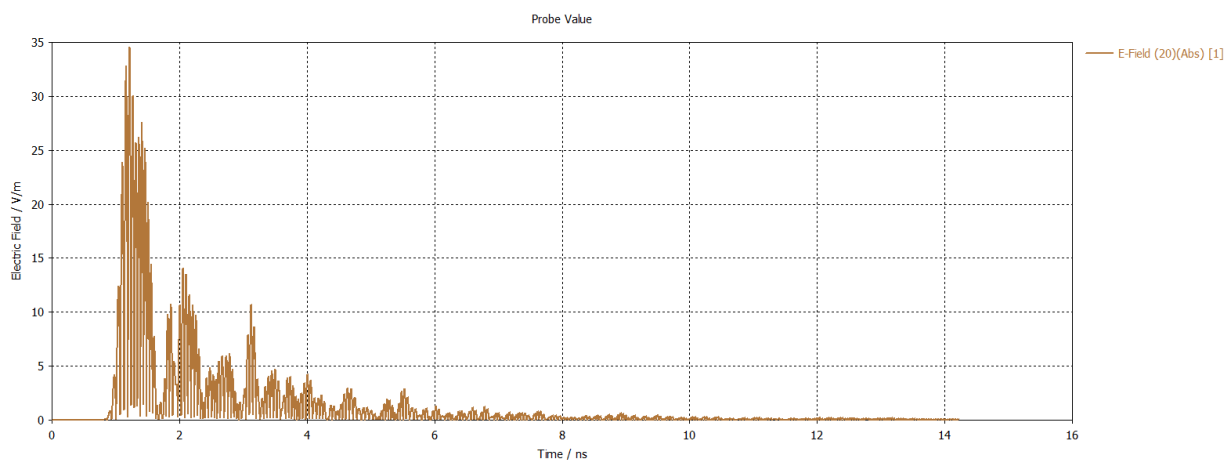




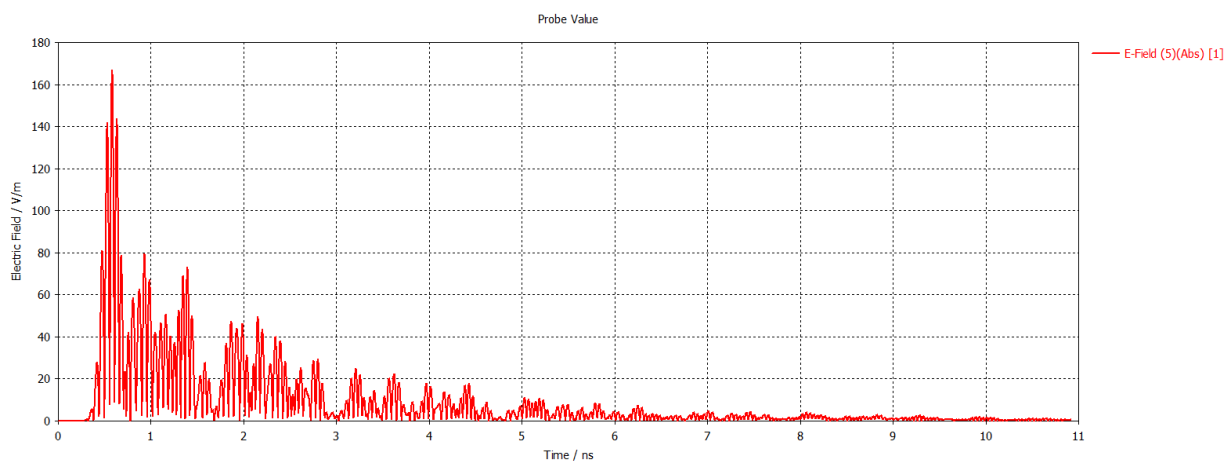
Сравнивая результаты во второй раз, можем убедиться в правильности предыдущего вывода. При углах в диапазоне 20 — 30 градусов можем заметить даже сходство данных. Однако, при иных углах всё более отчётливо заметна разница в вычислениях. Вероятнее всего это связано с частотным диапазоном CST.

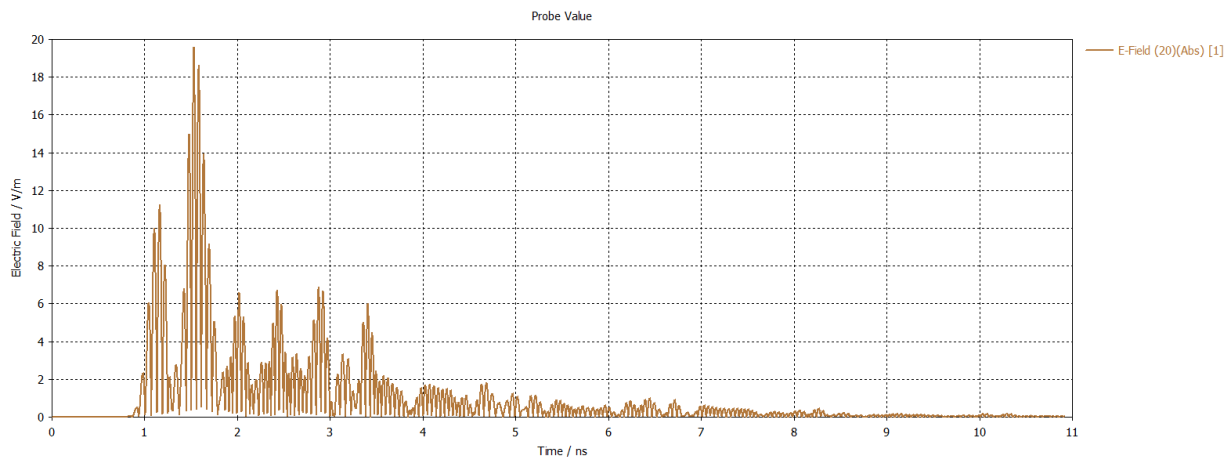
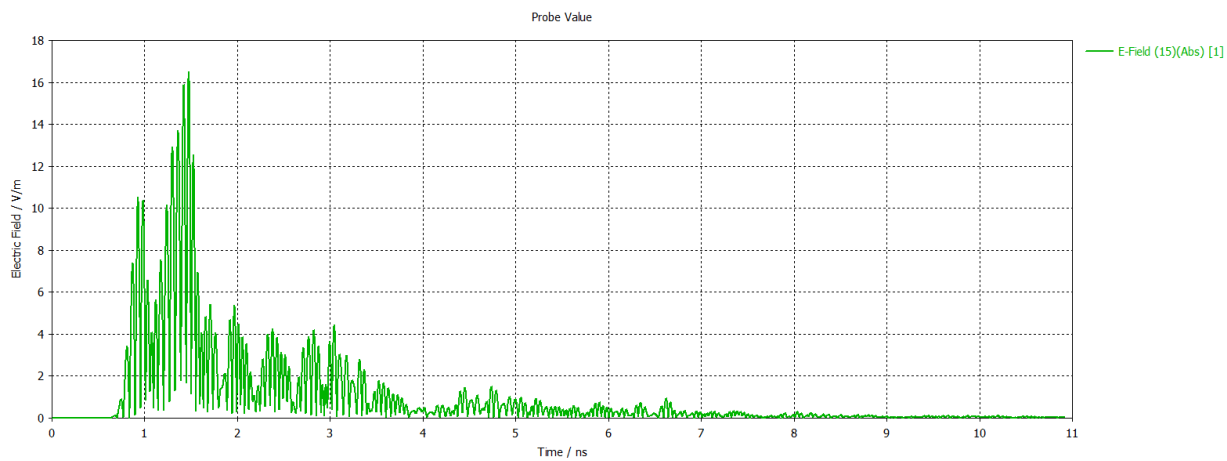
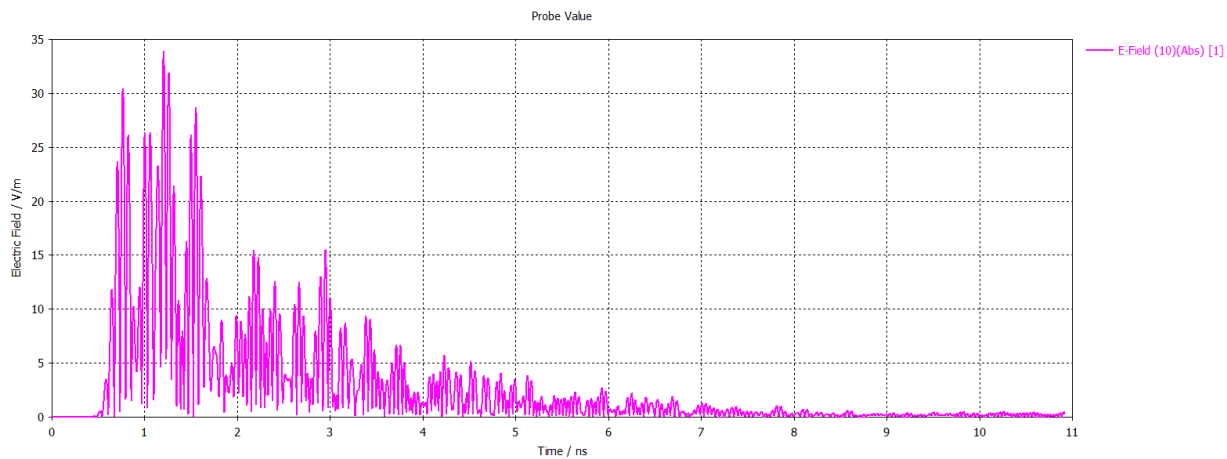
Предоставим результаты на 15, 10:

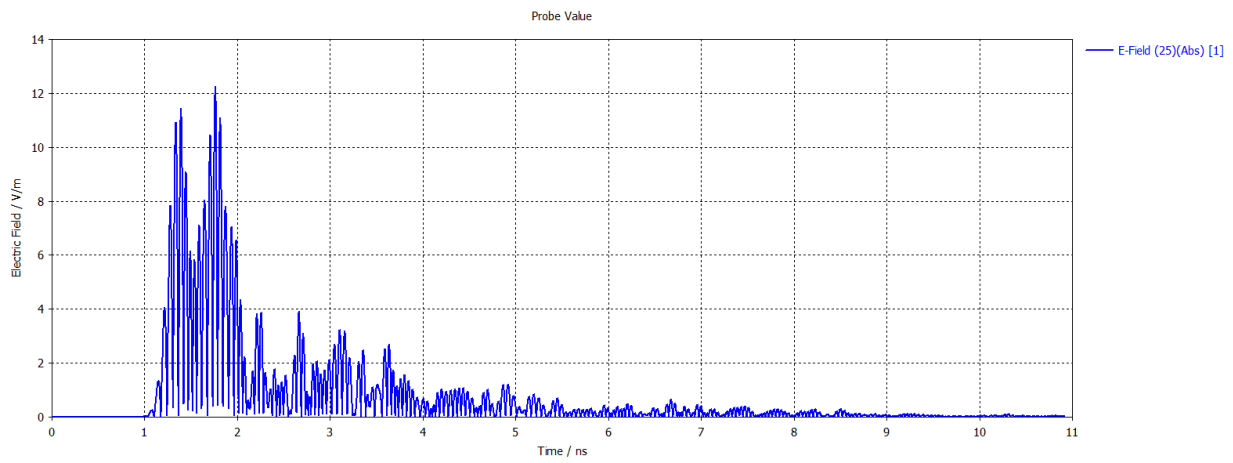




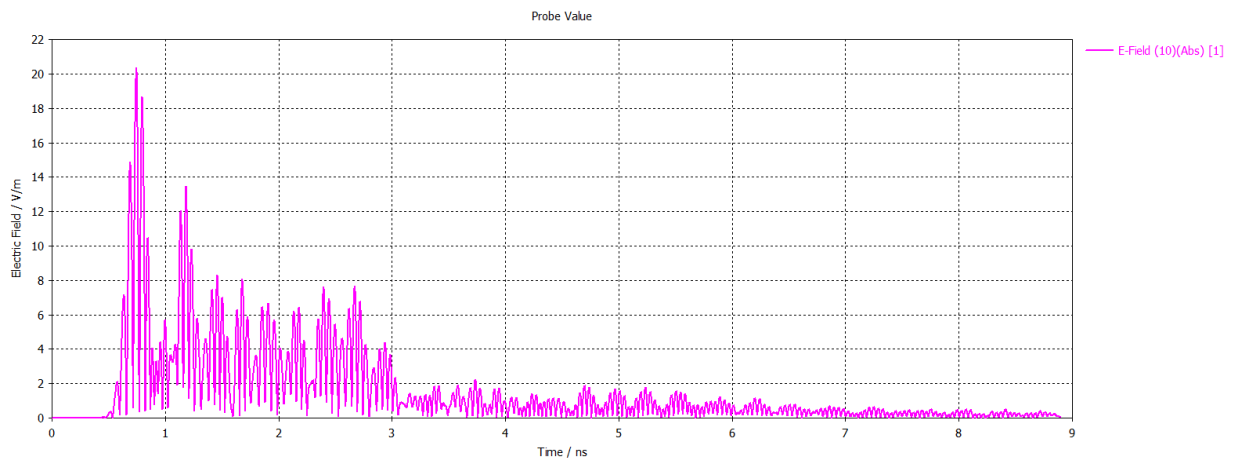
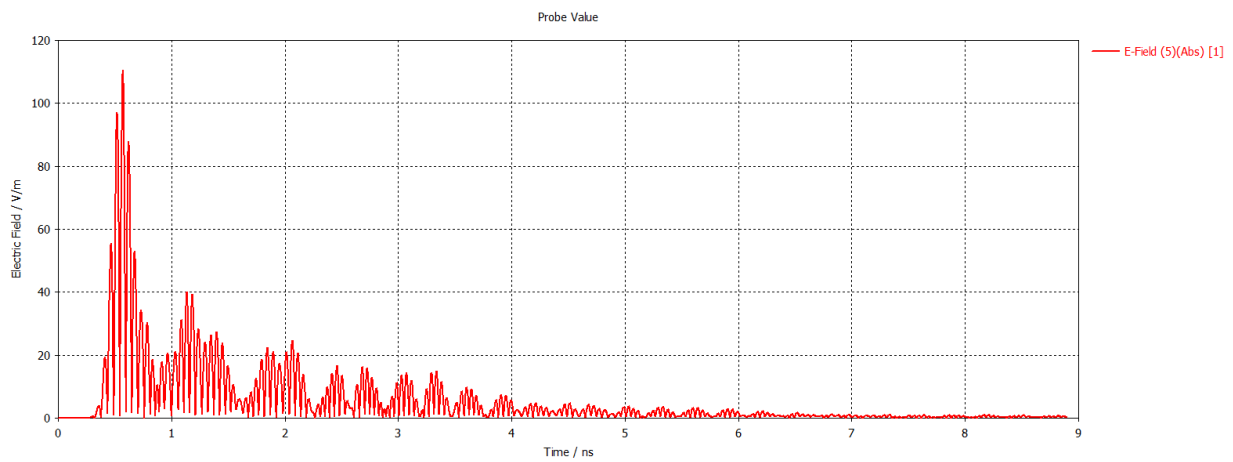
15,20

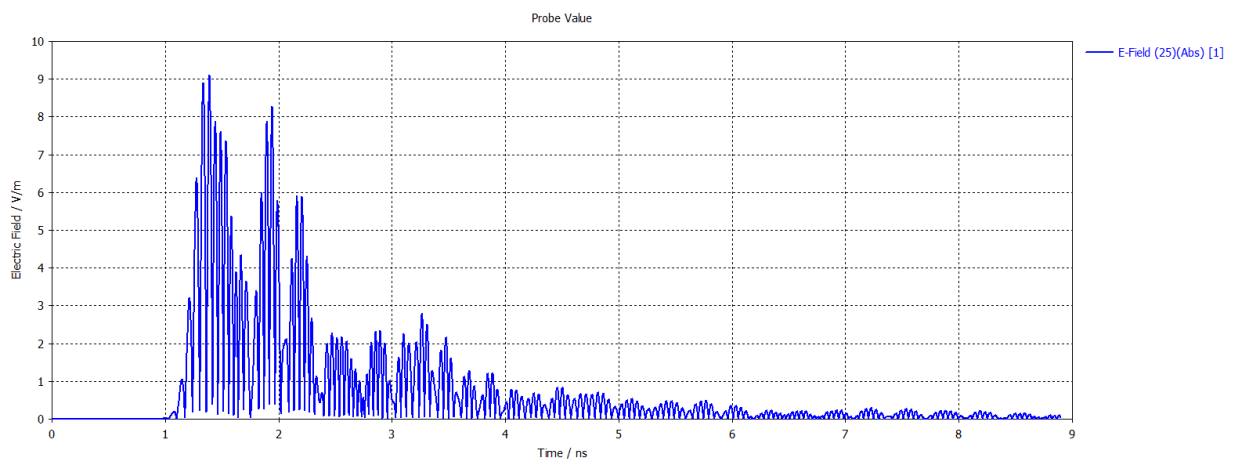
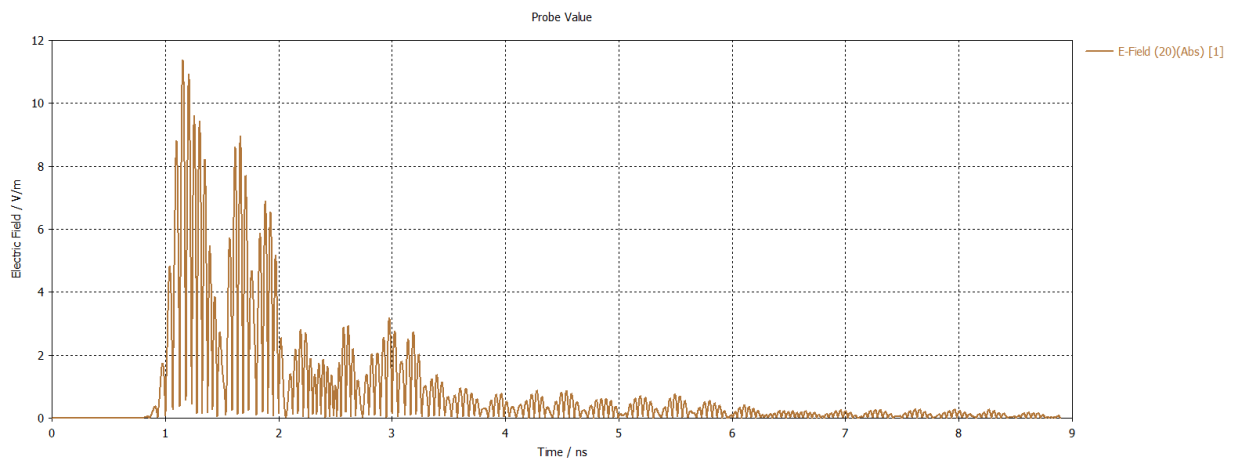
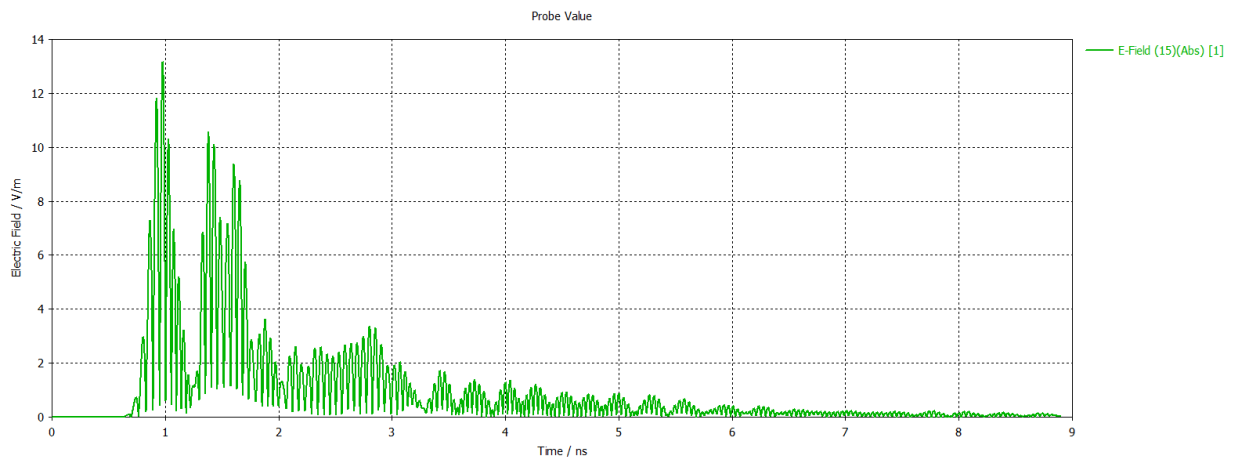






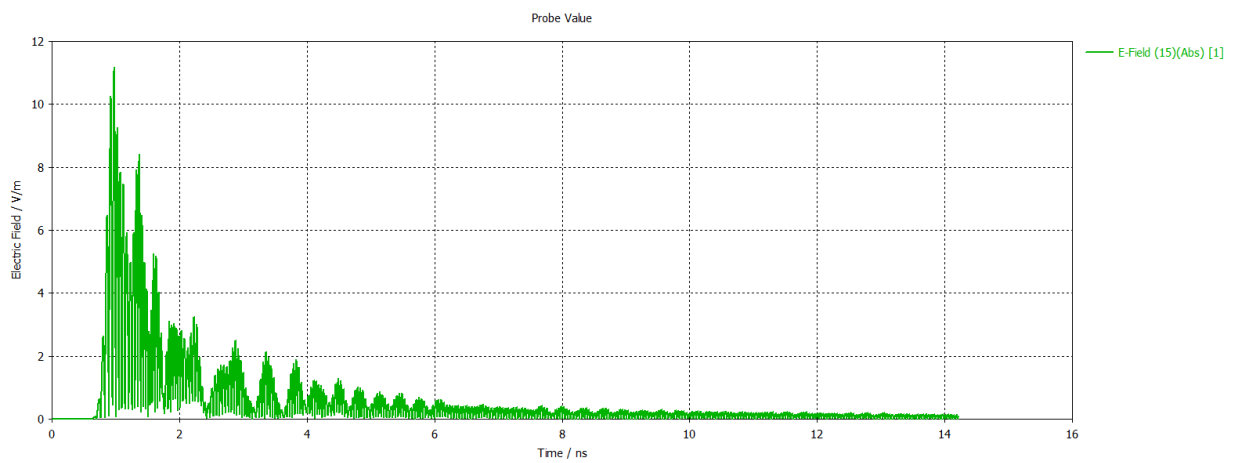
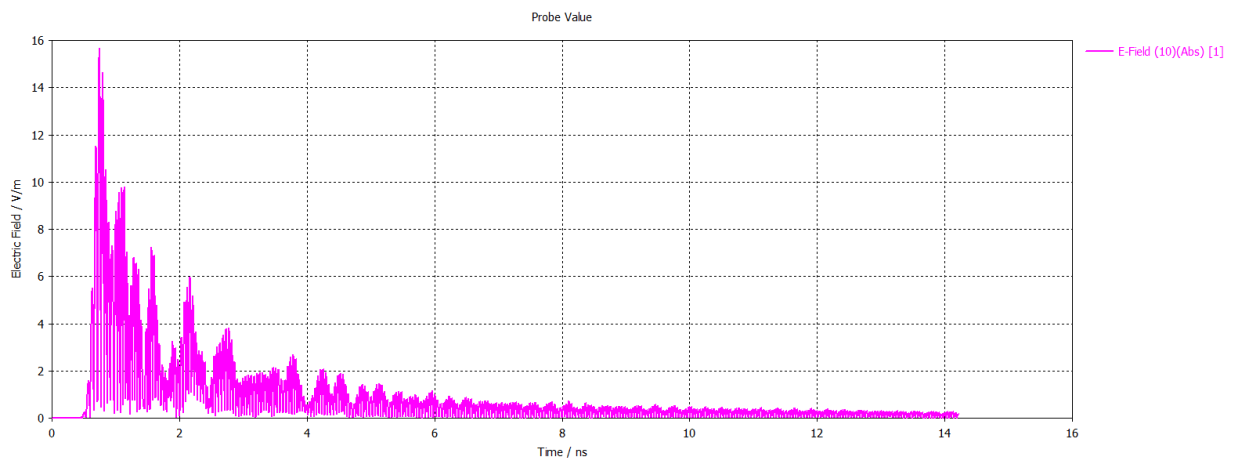
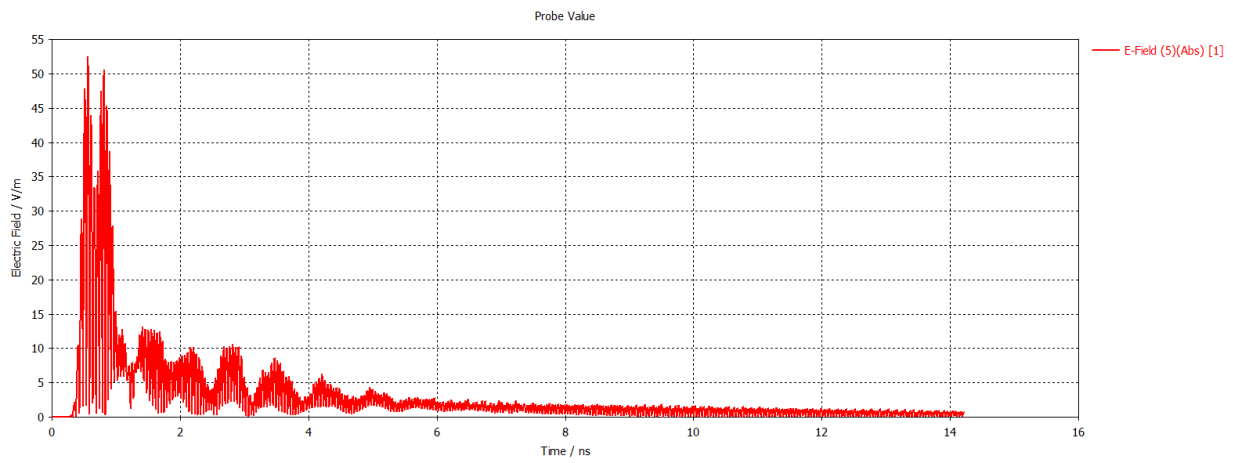
15,30

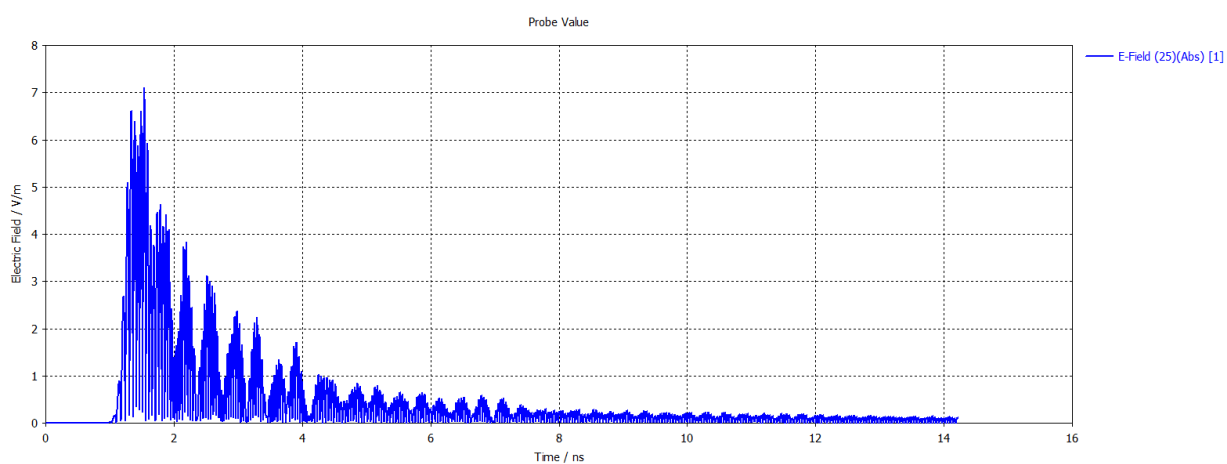
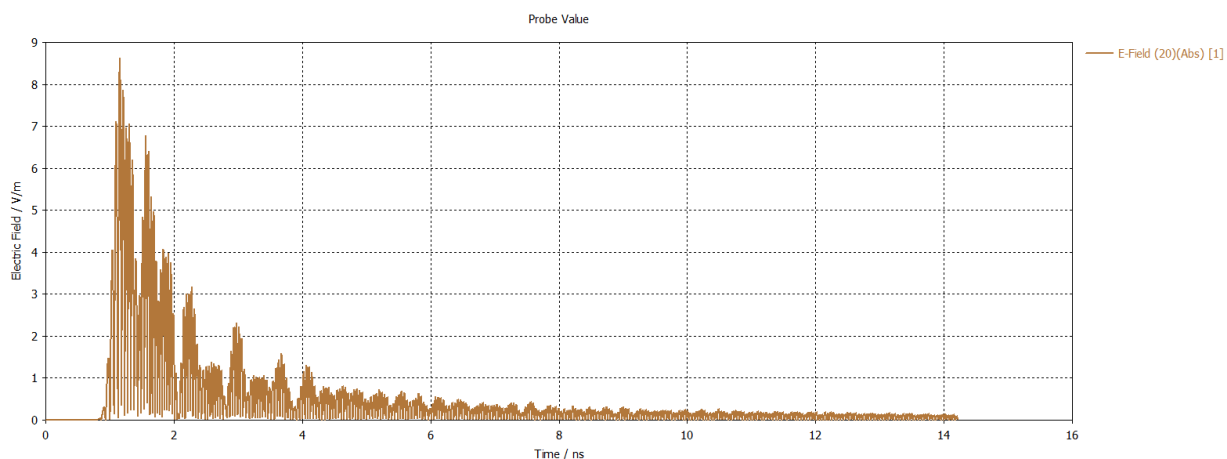




15,40

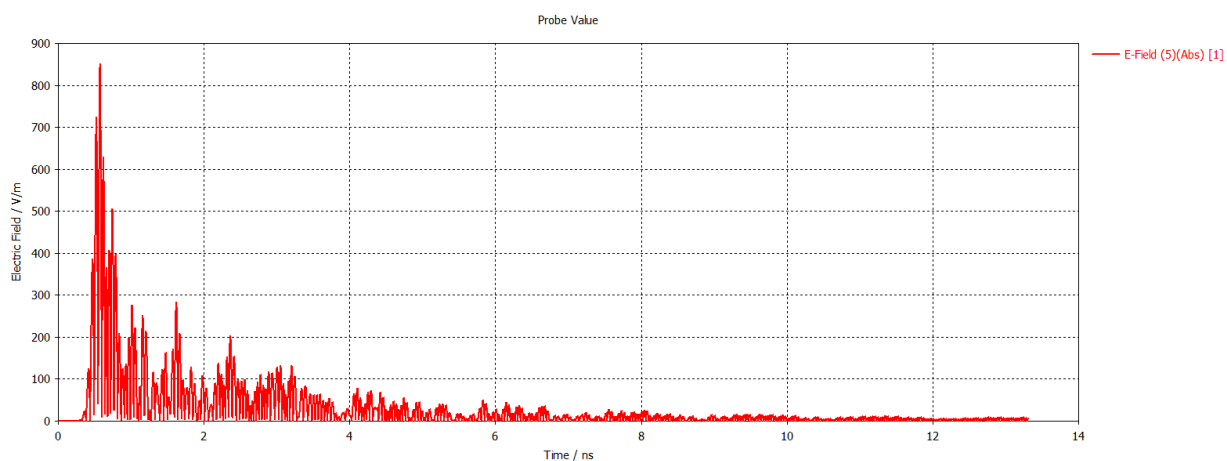


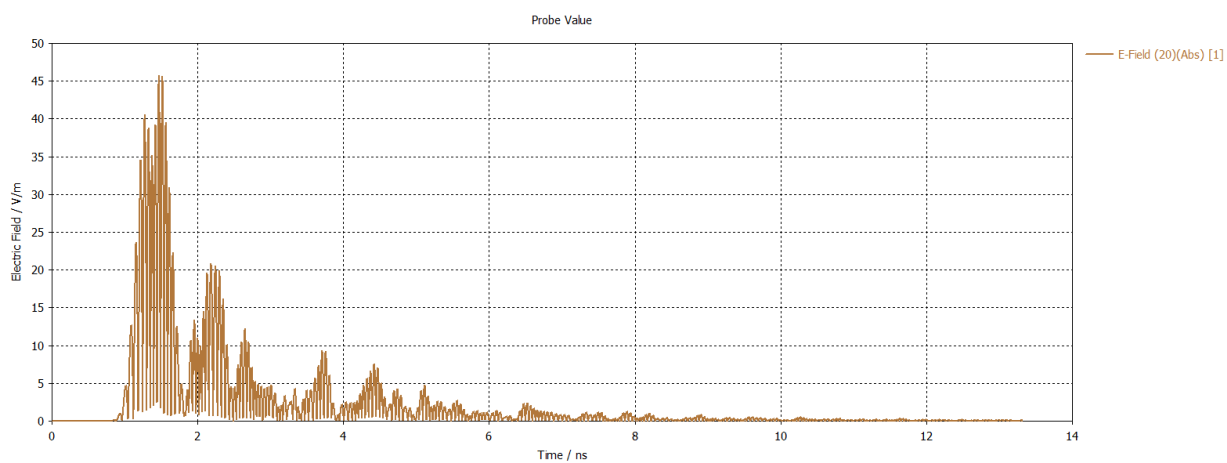
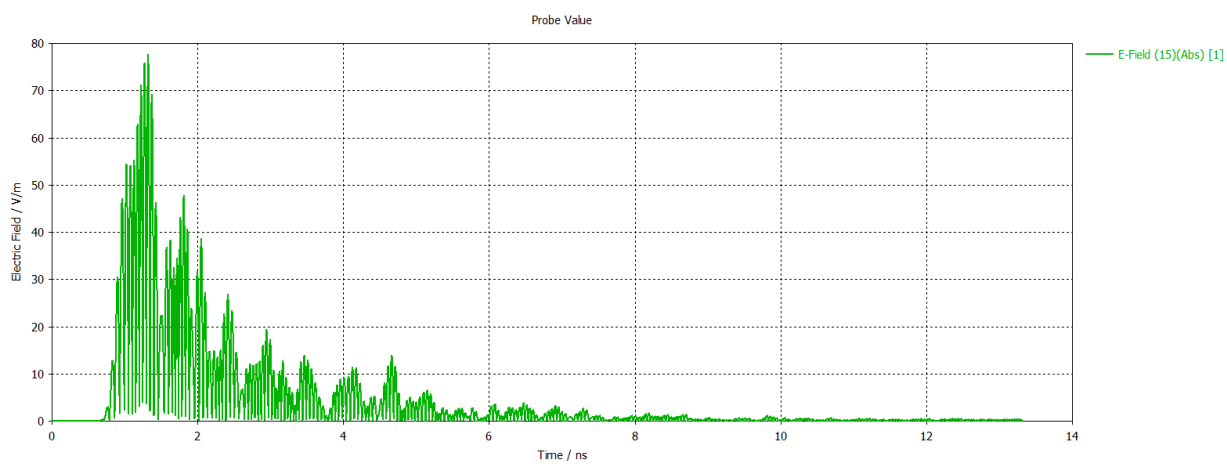
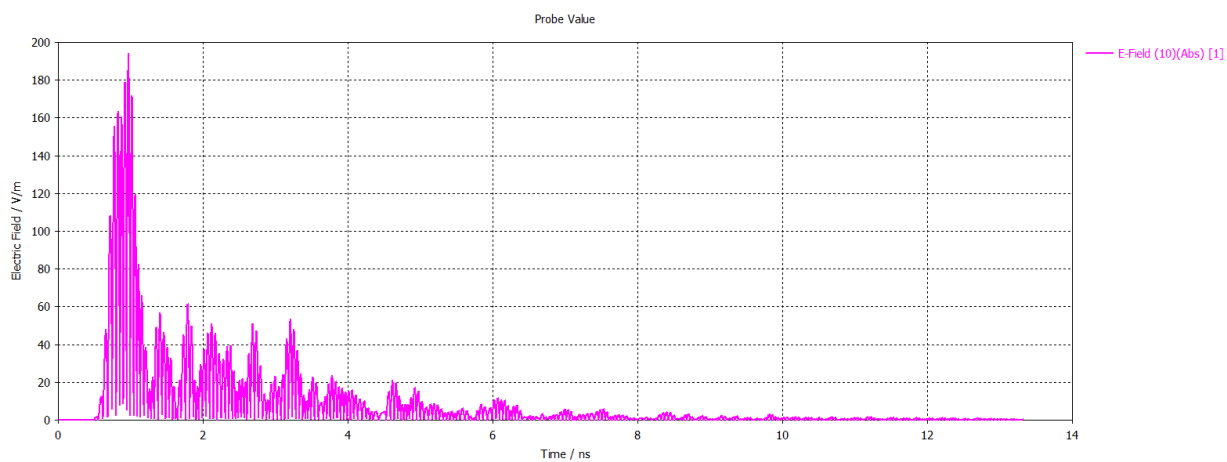


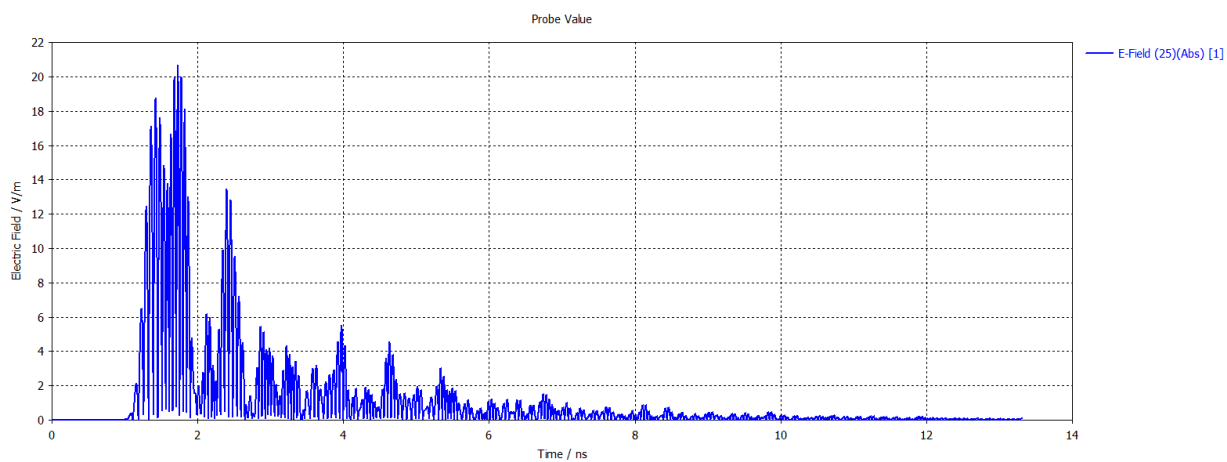


Как не трудно заметить, при приближении к границам четверти разница между расчётами не перестаёт расти, однако, чем угол ближе к центру четверти, тем более отчётливы совпадения.

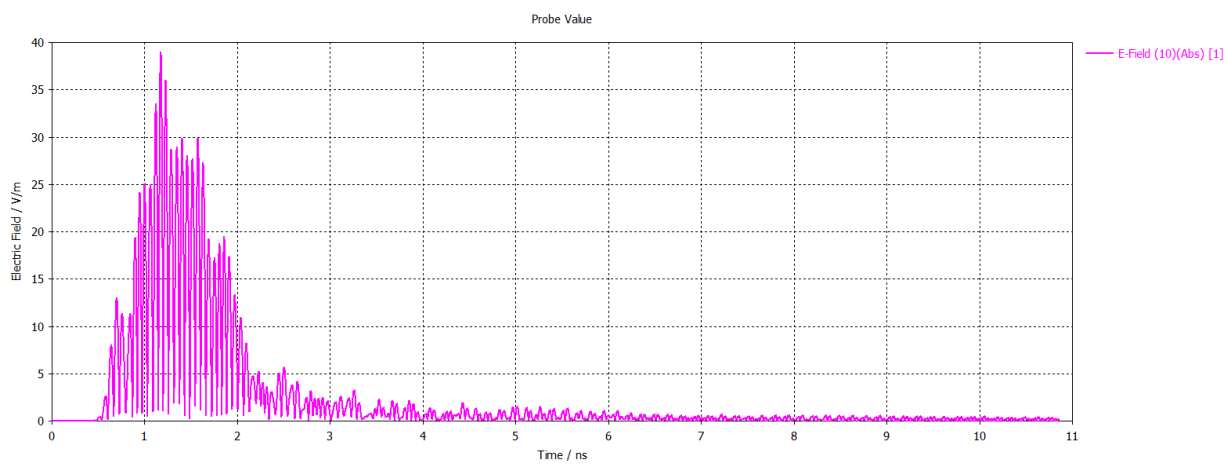
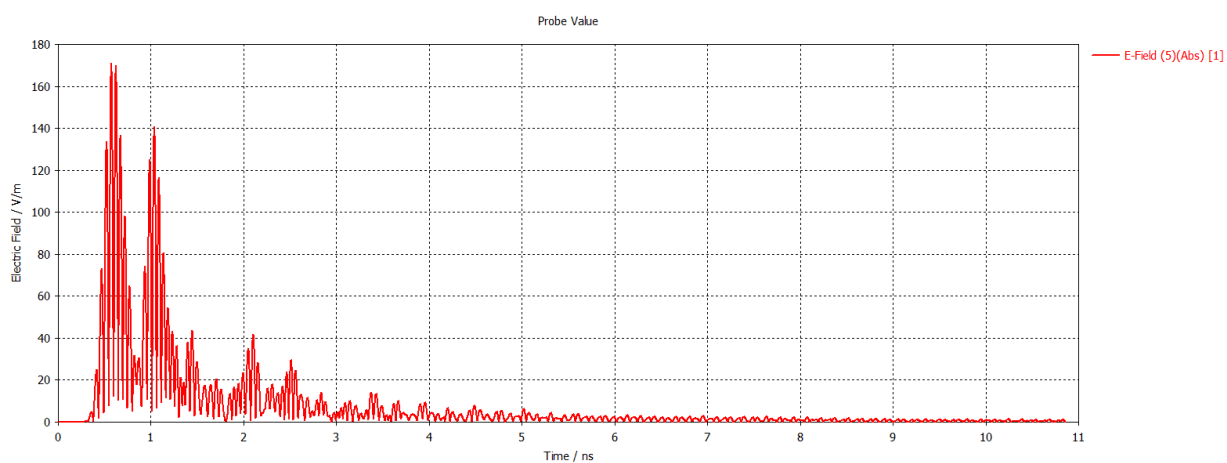
Далее продемонстрируем результаты для 20, 10

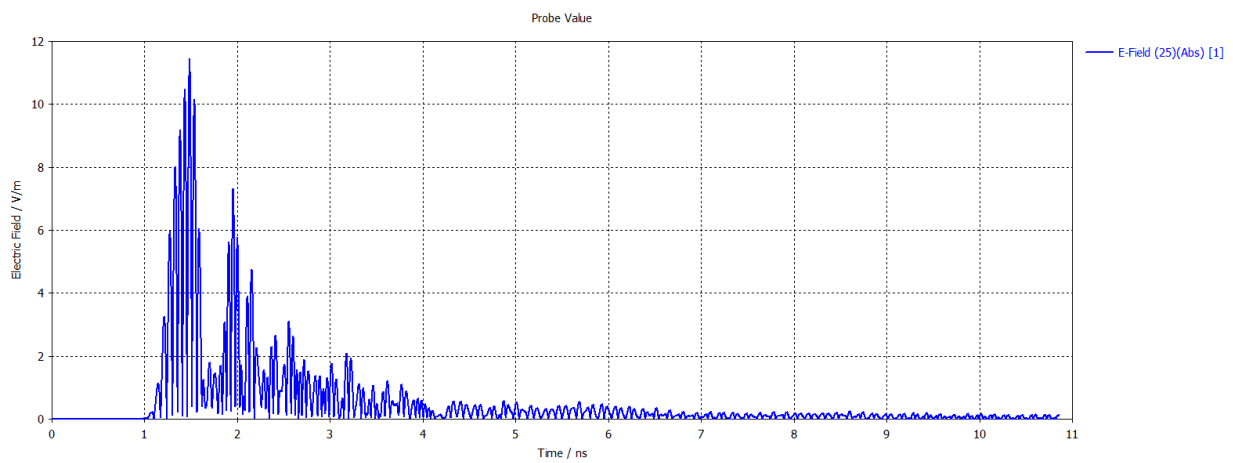
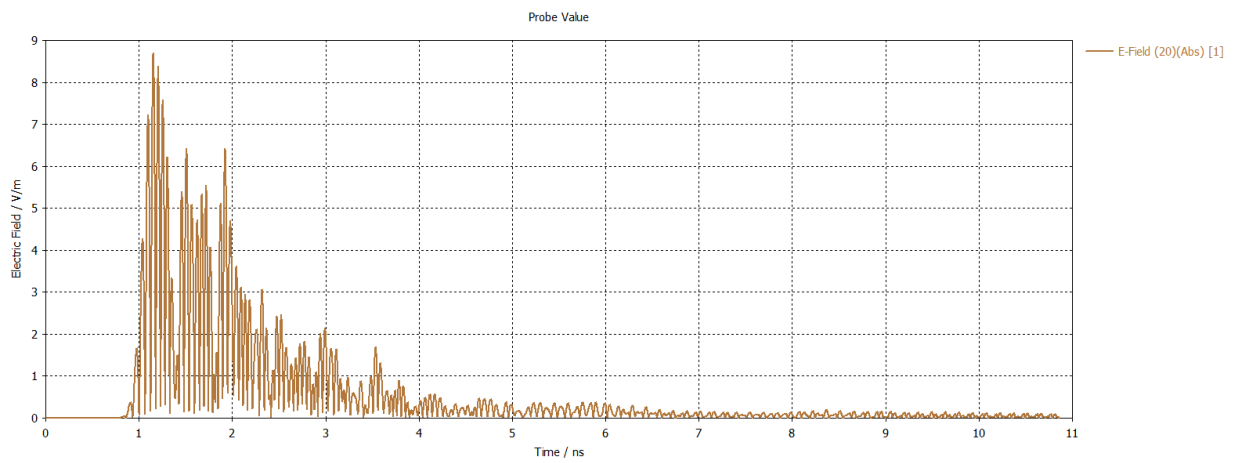
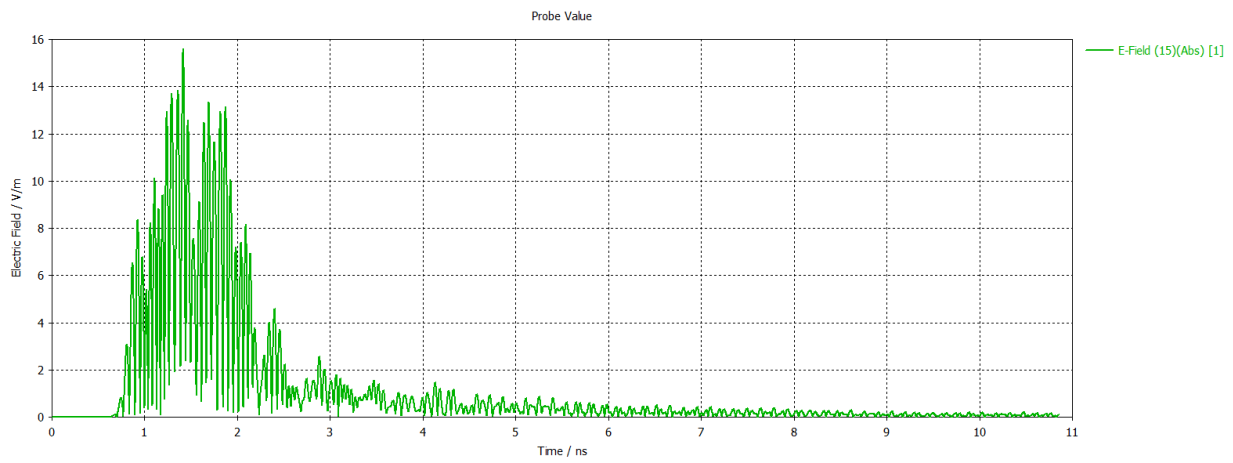




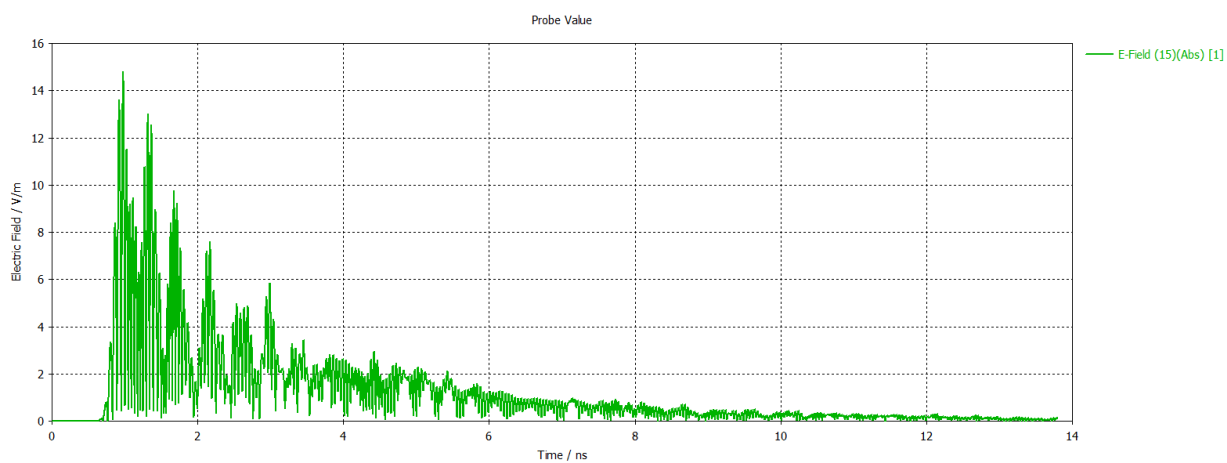
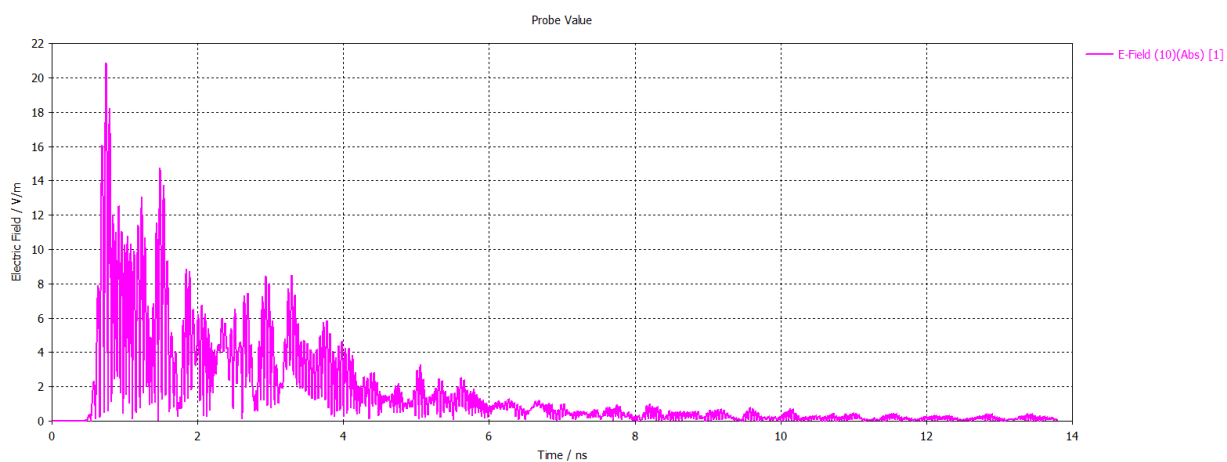
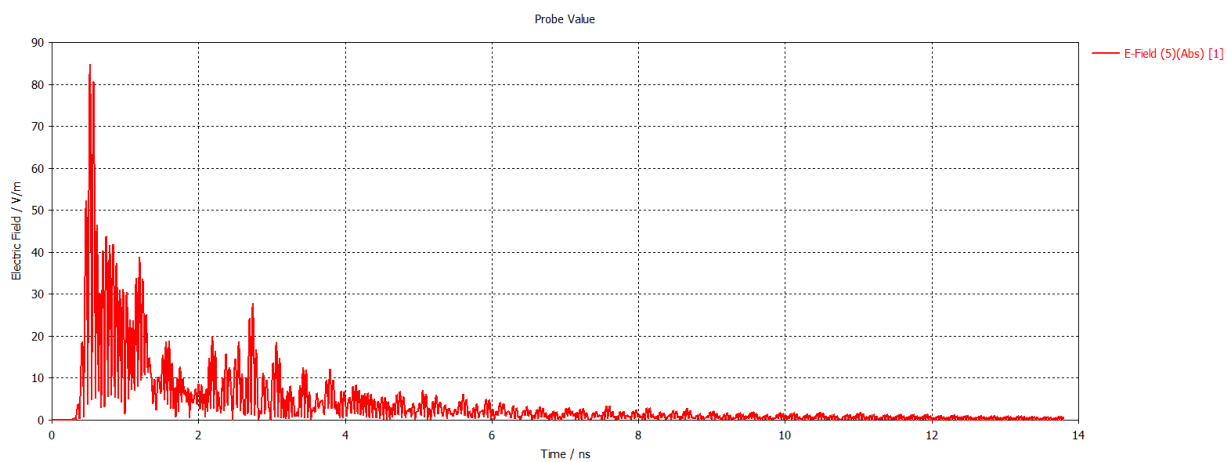


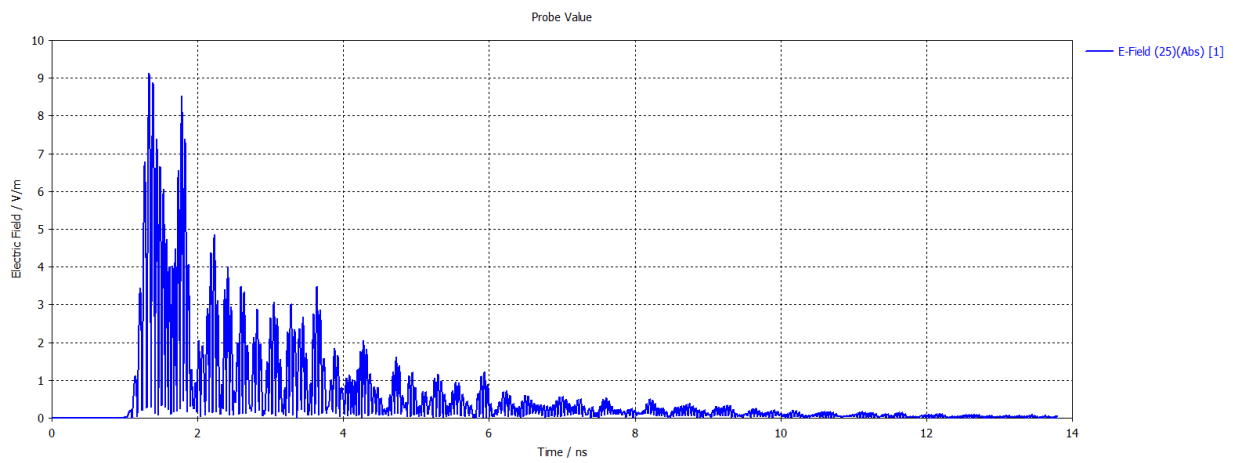
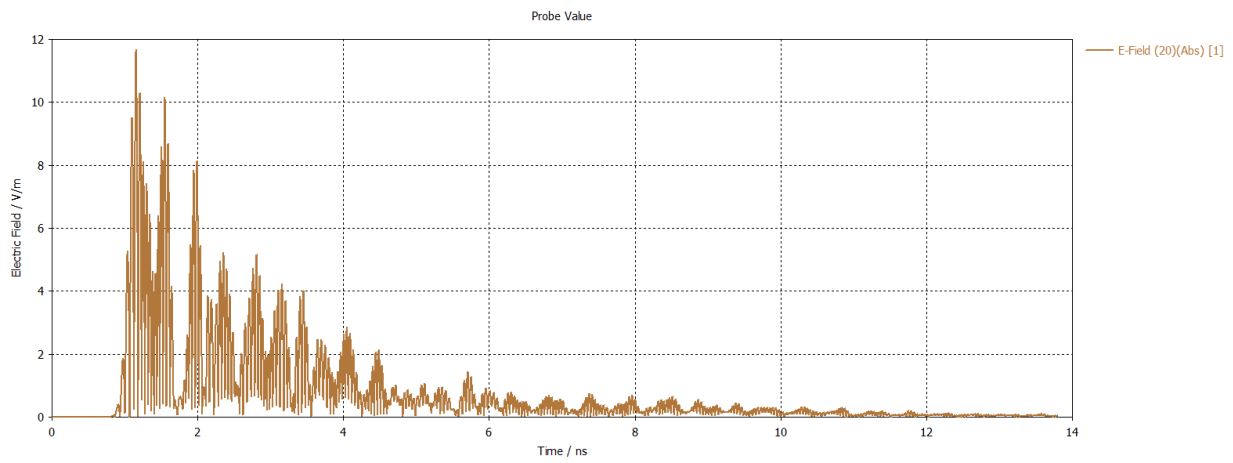
20,20



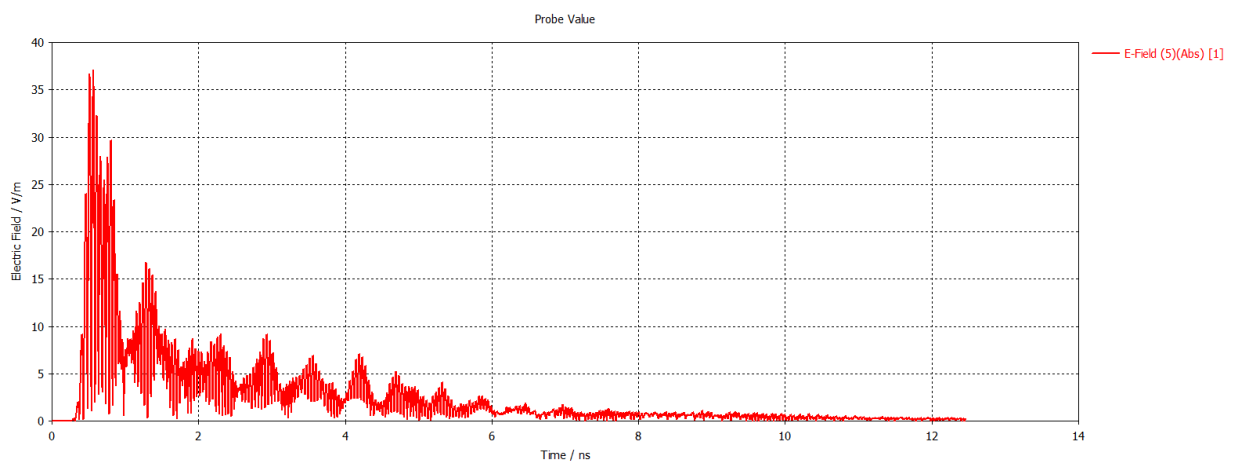


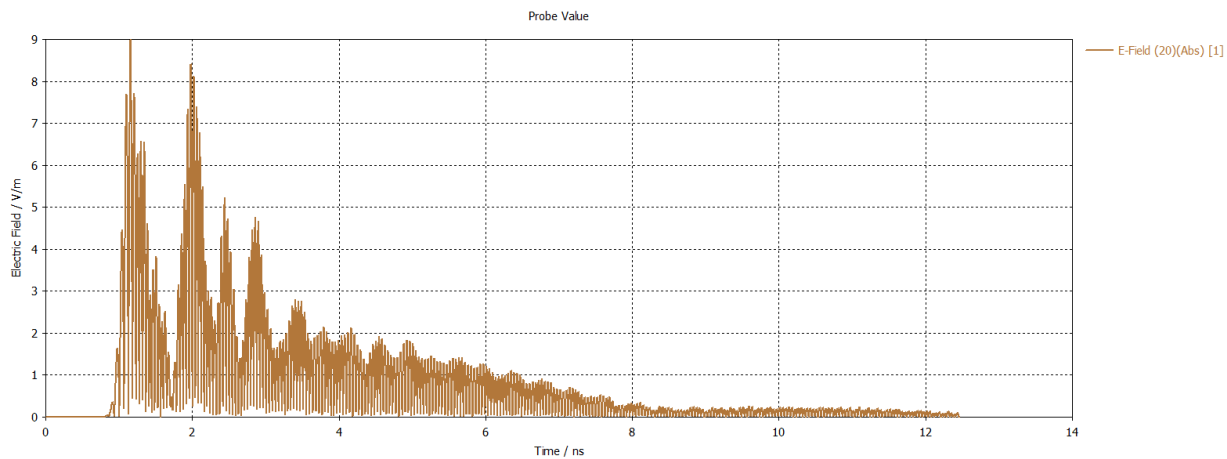
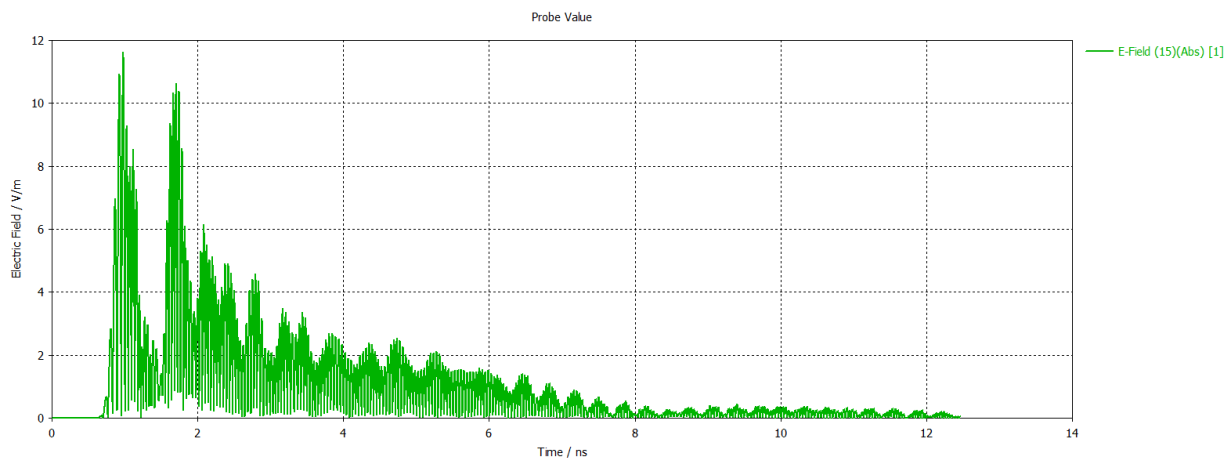
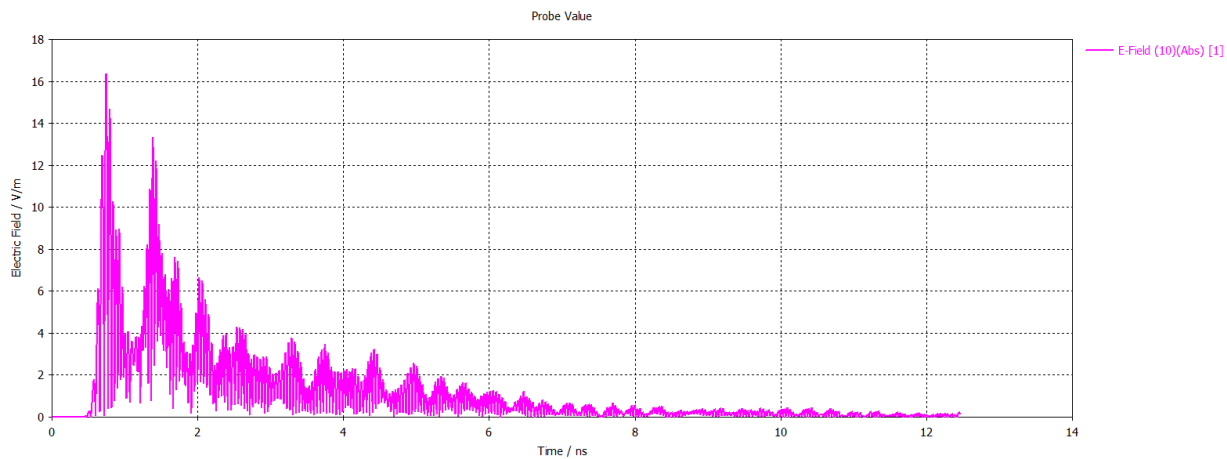
20,30



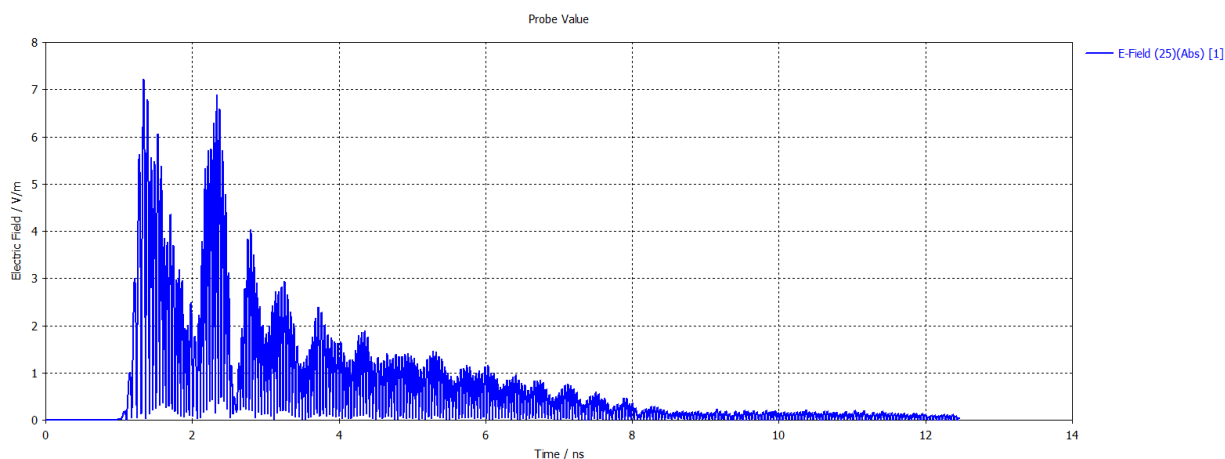


20,40



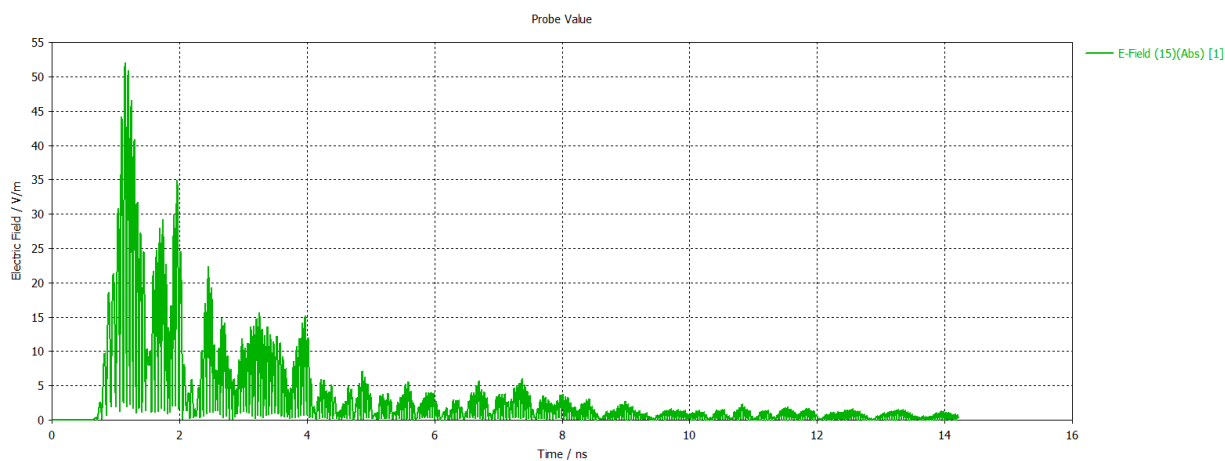
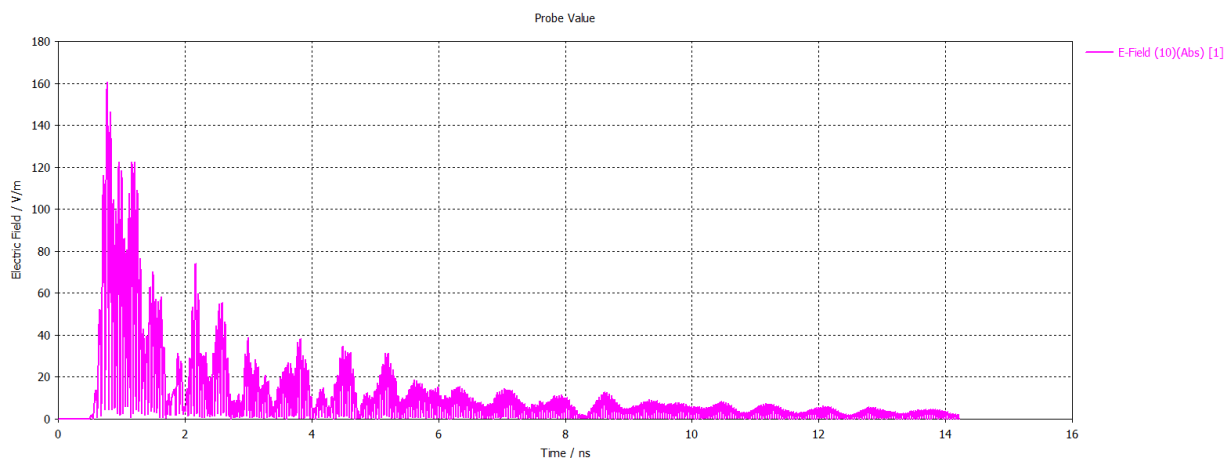


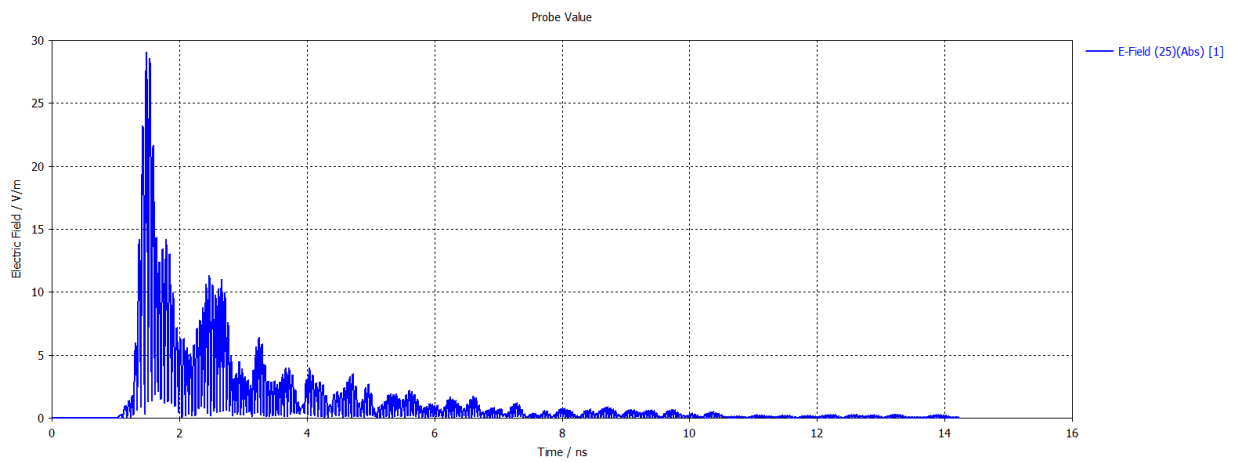
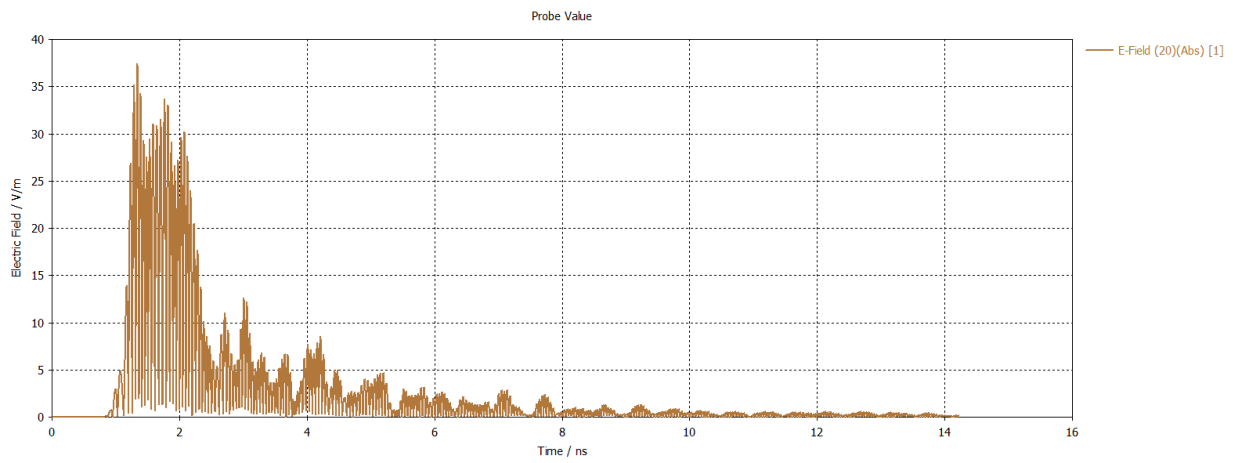




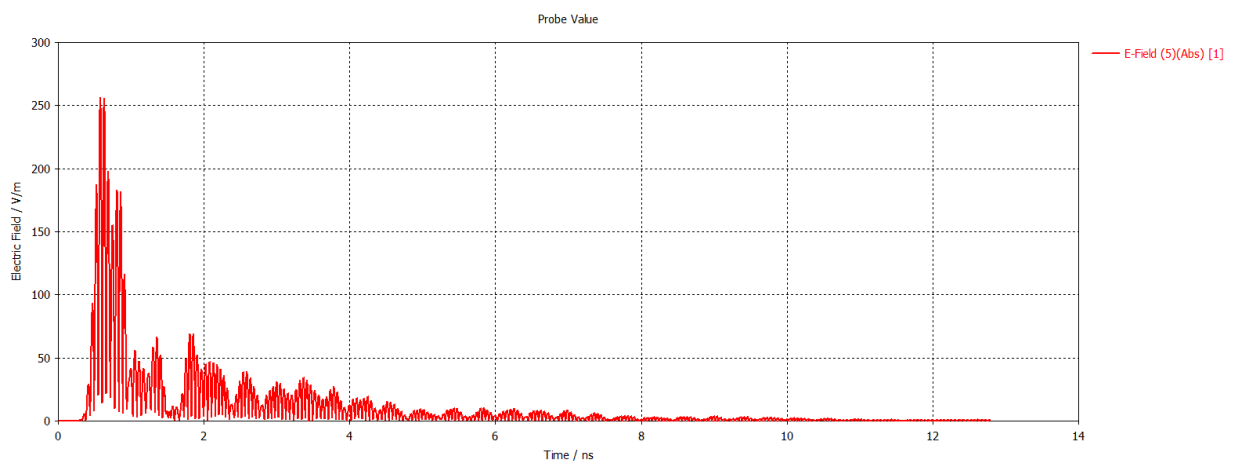
Не смотря на предыдущие оценки, теперь мы наблюдаем усиление поля в зарядовой модели, и на границах четверти разница заметно снизилась. К тому же, при центральных углах "просадка" исчисленных данных заметно ниже, чем данных, полученных при помощи модуляции.

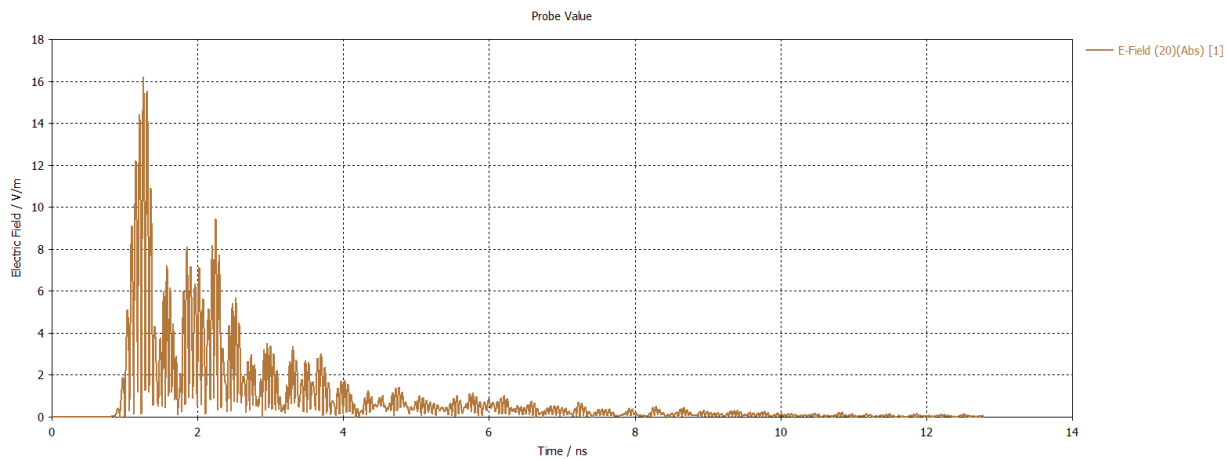
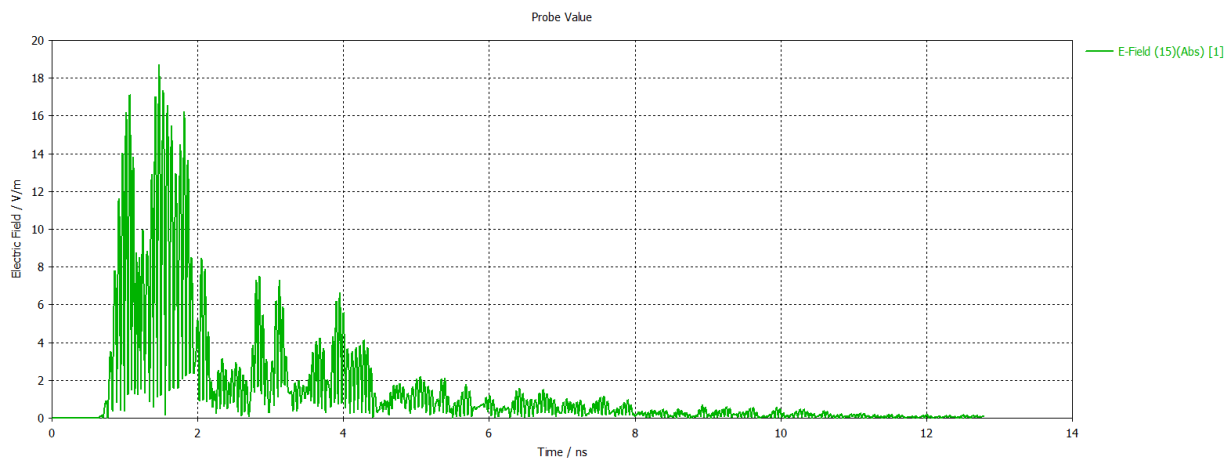
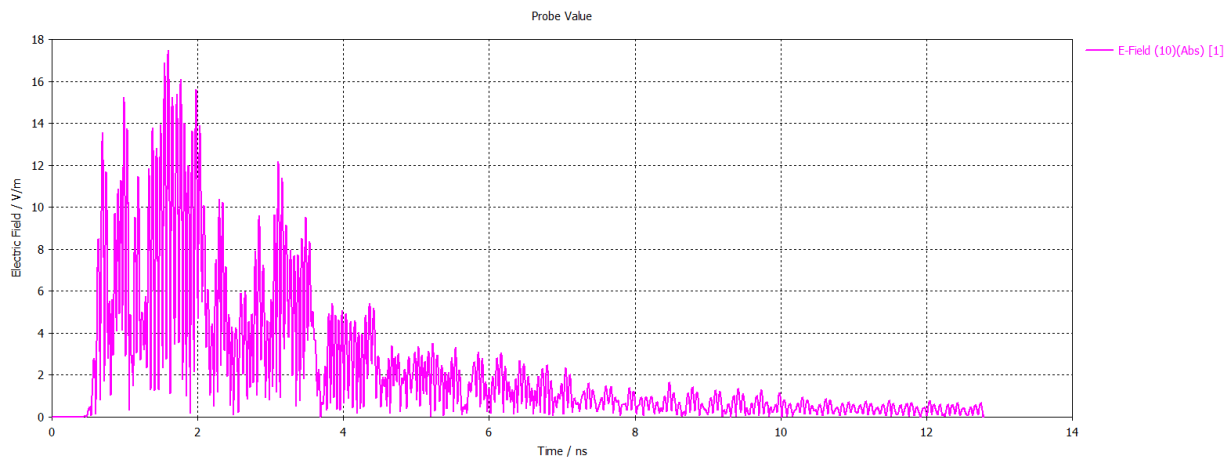
Пришла очередь сравнения 25, 10

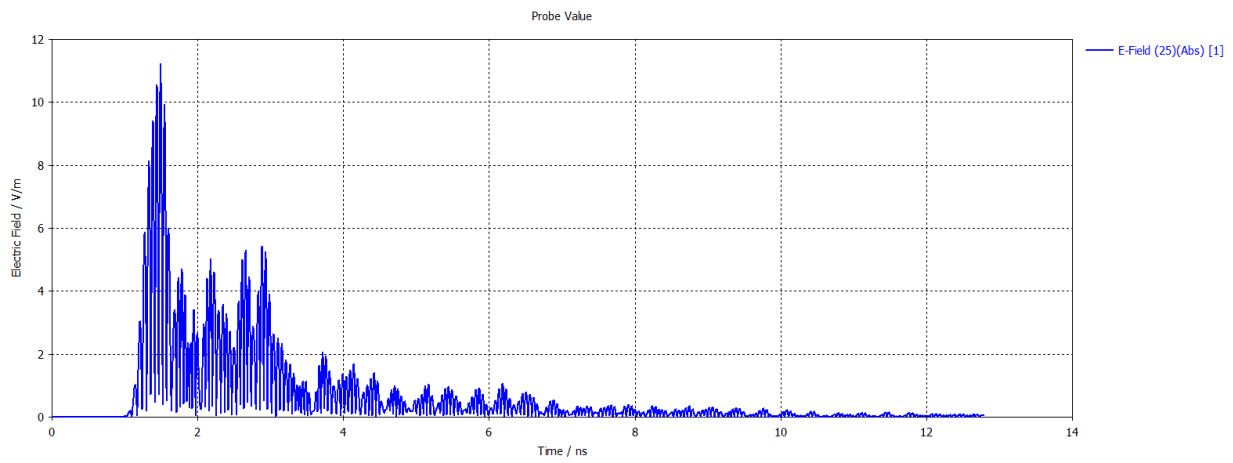




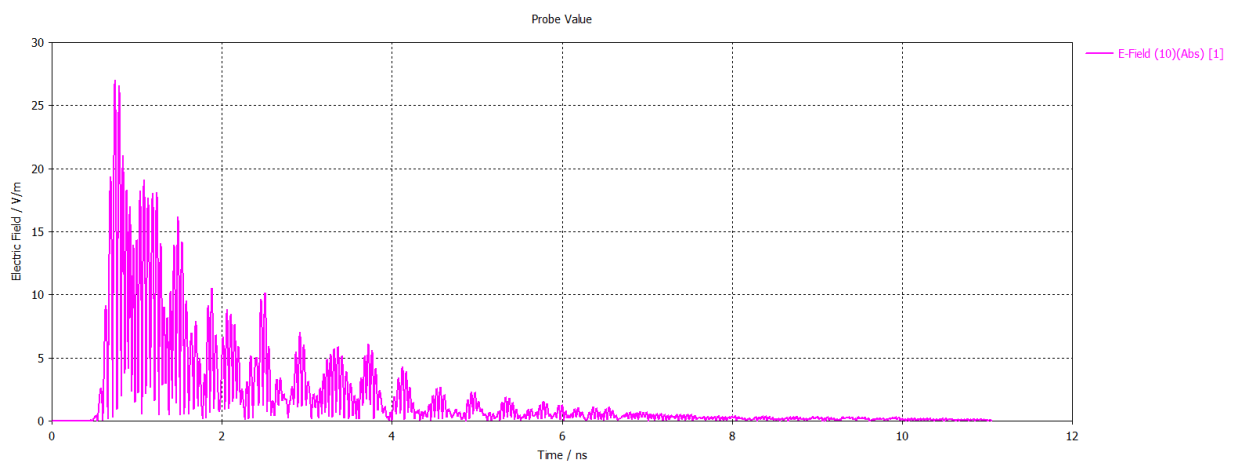
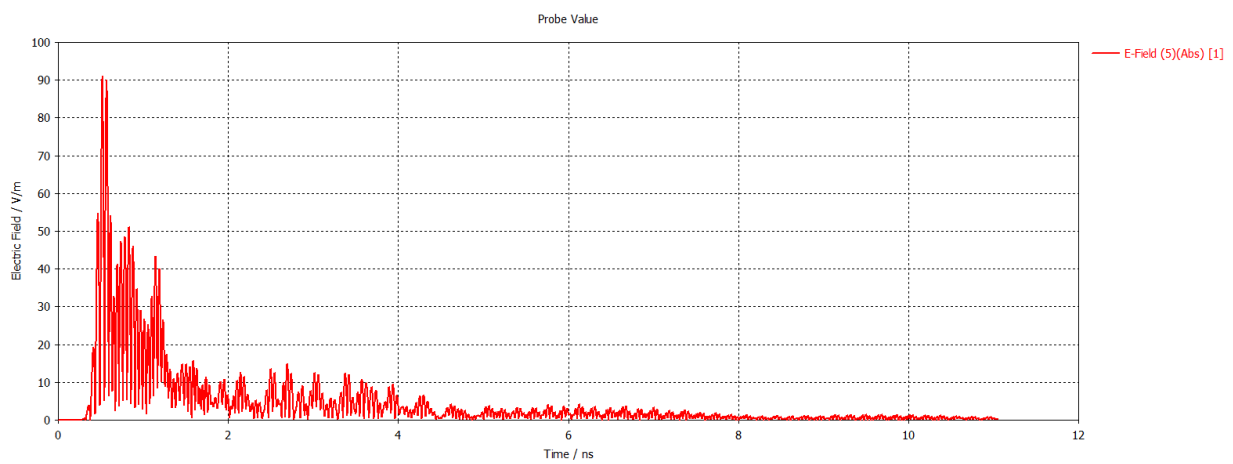
25,20

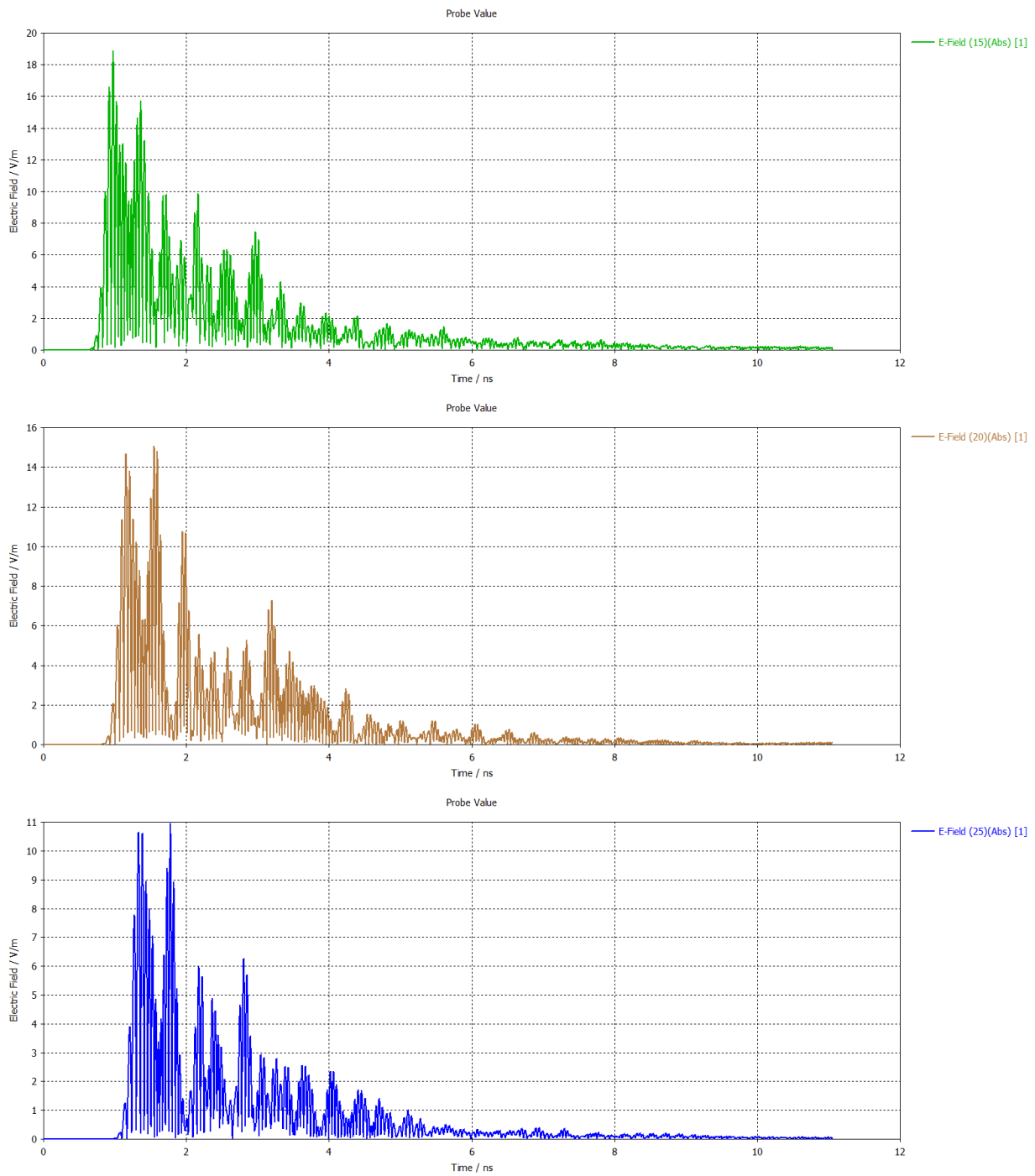


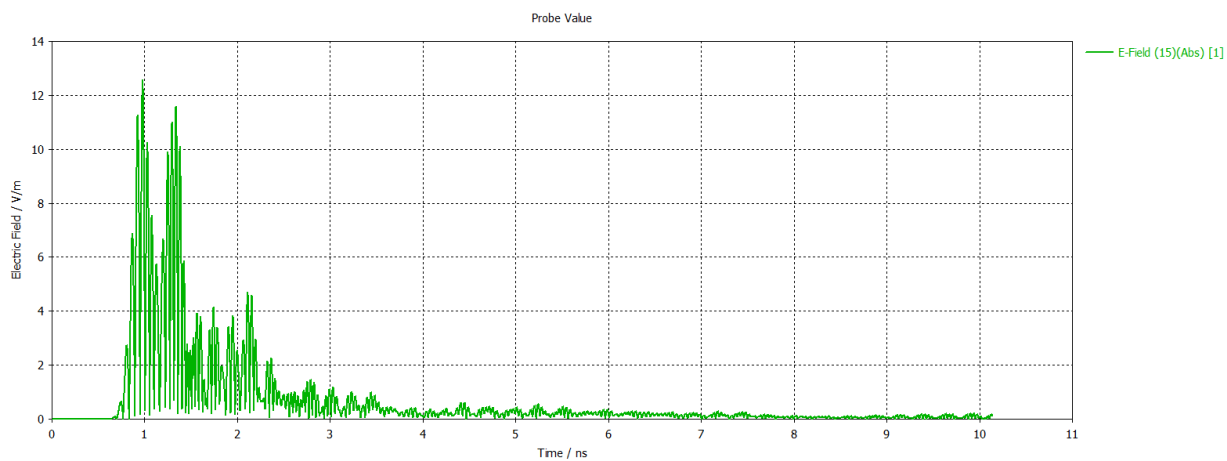
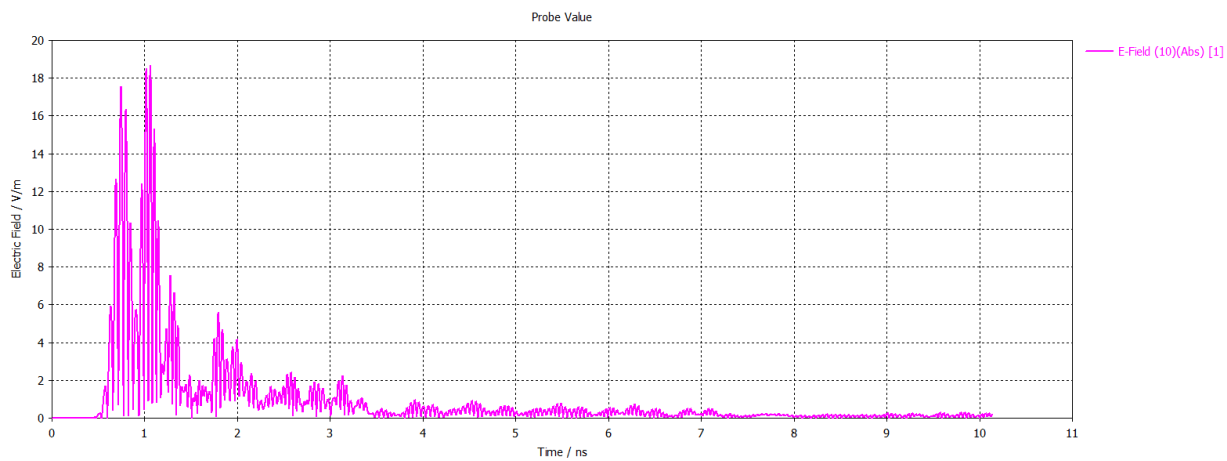
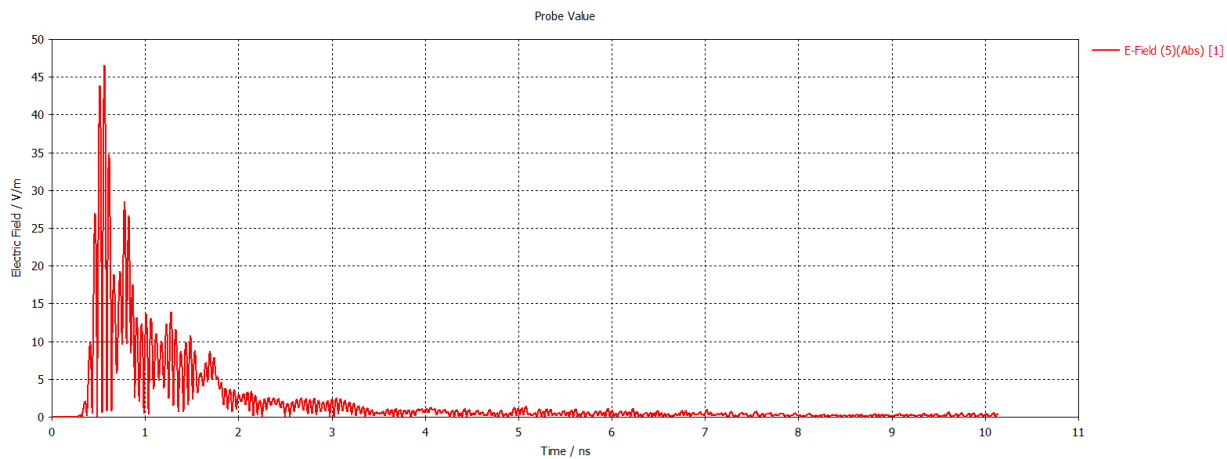


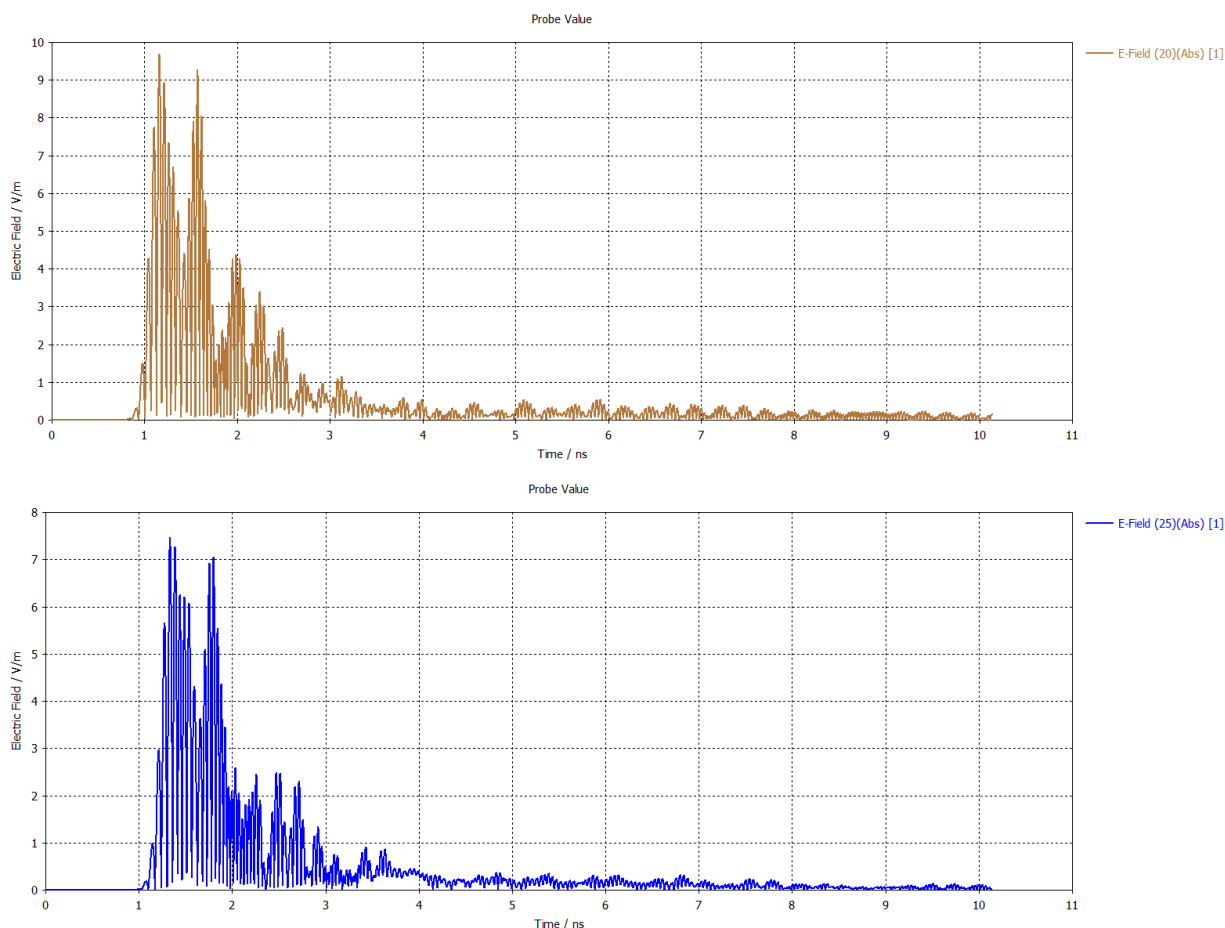


25,30









В этих случаях, расхождения сведены к минимуму, из чего можно сделать вывод о том, что зарядовая теория в самом деле слабо противоречит методу конечных разностей, и даже более того, результаты сходятся к некоей общей ожидаемой "линии" вычислений.

## Заключение

В предоставленной работе была исследована применимость зарядовой модели по отношению к треугольной антенне. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что данный метод расчёта полей не противоречит методу конечных разностей.

Простота заложенных в неё понятий обеспечивает относительно лёгкое понимание процесса излучения импульсных сигналов, но в то же время, вывод необходимых формул занимает отдельное место среди тяжёлых, и в то же время весьма увлекательных задач.

Проблема подобного излучения не была исследована полностью в данной работе, и потому представляет особый интерес для дальнейшего изучения. Помимо нахождения общих формул, есть задача о представлении последних в численных методах для решения связанных с этим методом задач на программной основе, в связи с выдающейся трудоёмкостью данного процесса.

## Листинг А

Файл math\_func.h

```
#ifndef MATH_FUNC_H_INCLUDED
#define MATH_FUNC_H_INCLUDED
#pragma once
#include <iostream>
#include "structs.h"
#include "error_lib.h"
const static float Pi = 3.141592653589793;
const static float w = 120 * Pi;
const static float c = 3 * pow(10,8);
const static float tacos = Pi / 180;
//R'
float Rs(float R, float l, float betta)
{
    return sqrt(pow(R,2) + pow(l,2) - 2*R*l*cos(betta *
                                                tacos));
};
//tau
float tau0(float R, float l, float betta)
{
    return (-R/(c * (1 + cos(betta * tacos))));
}
float tau1(float R, float l, float betta)
{
    return (-R/c - l*cos(betta * tacos))/(1-c*cos(betta *
                                                tacos));
}
//tau finalx
float t00(float R, float l, float betta)
{
    return tau0(R, l, betta);
}
```



```

};
float t01(float R, float l, float betta)
{
    return tau1(R, l, betta);
};
float t10(float R, float l, float betta)
{
    return (tau0(R, l, betta) + ((1/c)*(l +
        sqrt(pow(R,2)+pow(l,2)-
            2*R*l*cos(betta * tacos))-R)));
};
float t11(float R, float l, float betta)
{
    return (tau1(R, l, betta) + ((1/c)*(l +
        sqrt(pow(R,2)+pow(l,2)-
            2*R*l*cos(betta * tacos))-R)));
};
float t20(float R, float l, float betta)
{
    return (tau0(R, l, betta) + ((1/c)*(l+Rs(R, l,
        betta))));
};
float t21(float R, float l, float betta)
{
    return (tau1(R, l, betta) + ((1/c)*(l+Rs(R, l,
        betta))));
};
//cos gamma
float cosy(float R, float l, float betta)
{
    return ((R - l*cos(betta*tacos))/Rs(R, l, betta));
};
//E block

```

```

float E0(float R, float l, float betta)
{
    return ( -((w)/2*Pi*R)*(1/tan(betta/2)) );
};
float E1(float R, float l, float betta)
{
    return ( -(2*(cosy(R,l,betta)/sin(betta * tacos))) );
};
float E2(float R, float l, float betta)
{
    return ( tan((betta * tacos)/2) );
};
//H block
float H(float E)
{
    return E/w;
}
//evaluate tau
void evalTau(float R, float l, float betta, SolvedData *Data)
{
    Data->tau[0] = t00(R, l, betta);
    Data->tau[1] = t01(R, l, betta);
    Data->tau[2] = t10(R, l, betta);
    Data->tau[3] = t11(R, l, betta);
    Data->tau[4] = t20(R, l, betta);
    Data->tau[5] = t21(R, l, betta);
    Data->FindMin();
    Data->tau[10] = Data->tau[5] + Data->min_tau + l / c;
    Data->tau[11] = Data->tau[10] * 2;
    Data->tau[8] = Data->tau[4] + Data->min_tau + l / c;
    Data->tau[9] = Data->tau[8] * 2;
    Data->tau[6] = Data->tau[3] + Data->min_tau + l / c;
    Data->tau[7] = Data->tau[6] * 2;
}

```

```

    Data->tau[4] = Data->tau[2] + Data->min_tau + l / c;
    Data->tau[5] = Data->tau[4] * 2;
    Data->tau[2] = Data->tau[1] + Data->min_tau + l / c;
    Data->tau[3] = Data->tau[2] * 2;
    Data->tau[0] = Data->tau[0] + Data->min_tau + l / c;
    Data->tau[1] = Data->tau[0] * 2;
};
//evaluate E
void evalE(float R, float l, float betta, SolvedData *Data)
{
    Data->E[0] = Data->E[1] = E0(R, l, betta);
    Data->E[2] = Data->E[3] = E0(R, l, betta);
    Data->E[4] = Data->E[5] = E1(R, l, betta);
    Data->E[6] = Data->E[7] = E1(R, l, betta);
    Data->E[8] = Data->E[9] = E2(R, l, betta);
    Data->E[10] = Data->E[11] = E2(R, l, betta);
    Data->NormE();
};
//evaluate H
void evalH(SolvedData *Data)
{
    for (int i = 0; i < 12; ++i)
        Data->H[i] = H(Data->E[i]);
}
//evaluate start
void startEvaluate(float R, float l, float betta, SolvedData
*Data)
{
    evalTau(R, l, betta, Data);
    evalE(R, l, betta, Data);
    evalH(Data);
};
#endif // MATH_FUNC_H_INCLUDED

```

## Листинг Б

Файл structs.h

```
#ifndef STRUCTS_H_INCLUDED
#define STRUCTS_H_INCLUDED
#pragma once
struct SolvedData
{
    float min_tau;
    float tau[12] = {0};
    float E[12] = {0};
    float H[12] = {0};
    void FindMin();
    void NormE();
};
void SolvedData::FindMin()
{
    min_tau = this->tau[0];
    for (int i = 0; i < 12; ++i)
        if (min_tau < this->tau[i])
            min_tau = this->tau[i];
};
void SolvedData::NormE()
{
    for (int i = 0; i < 12; ++i)
        if (E[i] < 0)
            E[i] = -E[i];
};
struct Nvalues
{
    int Nr;
    int Nl;
    int Nb;
```

```

    Nvalues();
    void Input(float *R, float *l, float *betta);
    void NormBetta(float *betta);
};
Nvalues::Nvalues()
{
    std::cout<<"Please, input number of R"<<std::endl;
    std::cin >> this->Nr;
    std::cout<<"\nPlease, input number of l"<<std::endl;
    std::cin >> this->Nl;
    std::cout<<"\nPlease, input number of betta"<<std::endl;
    std::cin >> this->Nb;
};
void Nvalues::Input(float *R, float *l, float *betta)
{
    std::cout << "Please, input your " << this->Nl << "
        values for l" << std::endl;
    for (int i = 0; i < this->Nl; ++i)
    {
        std::cout << i+1 << ":      _:";
        std::cin >> l[i];
    }
    std::cout << "Please, input your " << this->Nr << "
        values for R" << std::endl;
    for (int i = 0; i < this->Nr; ++i)
    {
        std::cout << i+1 << ":      _:";
        std::cin >> R[i];
    }
    std::cout << "Please, input your " << this->Nb << "
        values for betta angle" << std::endl;
}

```

```

    for (int i = 0; i < this->Nb; ++i)
    {
        std::cout << i+1 << ":      _:";
        std::cin >> betta[i];
    }
};

void Nvalues::NormBetta(float *betta)
{
    for (int i = 0; i < this->Nb; ++i)
    {
        betta[i]/=2;
    }
}

#endif // STRUCTS_H_INCLUDED

```

## Список литературы

- 1: H. Schantz, Ultrawideland Antennas, Artech House, 2005
- 2: Пономарёв Д. М. и др., Способ определения диаграммы направленности антенны в диапазоне частот, Б. И., 1988
- 3: Бахрах Л. Д., Курочкин А. П., Голография в микроволновой технике, М.: Сов. радио, 1979
- 4: Милстайн Л. Б., Методы подавления помех в системах радиосвязи с широкополосными сигналами, ТИИЭР, 1988
- 5: Астанин Л. Ю., Костылев А. А., Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений, М.: Радио и связь, 1989
- 6: Ковалев И. П., Пономарев Д. М. , Анализ процессов излучения и приёма импульсных сигналов во временной области, М.: Радио и связь, 1996
- 7: Фрадин Ф. З., Антенно-фидерные устройства, М.: Связь, 1977
- 8: Ковалев И. П., Пономарев Д. М., Ключев Е. А., Нестационарные процессы в проволочных антеннах при импульсном возбуждении, Радиотехника и электроника, 1991
- 9: Небабин В. Г., Гришин В. К., Методы и техника радиолокационного распознавания: современное состояние, тенденции развития, перспективы, Зарубежная радиоэлектроника, 1992
- 10: [https://github.com/demanxd/NIRS\\_Light\\_Solver\\_Triangular](https://github.com/demanxd/NIRS_Light_Solver_Triangular), 2019.