

Датчик поля для регистрации сверхширокополосных электромагнитных импульсов и алгоритм обработки его выходного сигнала

Н.П. Чубинский¹⁾, В.В. Чистюхин²⁾

¹⁾ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», Институтский пер., 9 Долгопрудный, Московской обл., 141700 nchub@mail.mipt.ru

²⁾Московский государственный институт электронной техники (технический университет), Проезд 4806, дом 5, Зеленоград, Москва, 124498, <http://miet.ru>

В работе решена задача восстановления истинной формы сверхширокополосного (СШП) импульса электромагнитного поля в точке расположения датчика поля. Обоснованы и приведены конструкция датчика поля СШП электромагнитных импульсов и алгоритм обработки его выходного сигнала.

The problem of restoration of the true form ultrawideband (UWB) electromagnetic field pulse in a sensor point is solved. The design of the UWB electromagnetic pulses sensor and algorithm of processing its output signal are proved and resulted.

1. Измерение параметров излученных сверхширокополосных (СШП) импульсов представляет интерес для многих прикладных и научных исследований. Они включают СШП радиолокацию предельно высокого разрешения, зондирование сред со средними и большими потерями (георадарные системы), беспроводные СШП линии коммуникаций, системы контроля параметров излученных электромагнитных импульсов. Последние используются при решении задач электромагнитной совместимости. В этом случае очень важно знать истинную форму электромагнитного импульса для определения его параметров, наиболее существенных для достижения максимальных результатов воздействия на электронные устройства и живые системы. Ведь при излучении СШП импульсов большинством стандартных антенн форма их изменяется из-за дисперсионных искажений. Как правило, их эффективная длительность увеличивается, а пиковые значения – уменьшаются, а они чаще всего и представляют наибольший интерес.

При разработке датчика поля (измерительной антенны) для регистрации ультракоротких импульсов электромагнитного поля возникает ряд проблем, связанных с большой относительной шириной спектра таких сигналов. Типичная полоса частот СШП импульсов составляет октаву или более. Конструкция датчика поля должна быть компактной для реализации высокого пространственного разрешения, а так же должна обеспечивать измерение мгновенной напряженности импульсного электромагнитного поля с минимальными искажениями формы и поляризационной структуры сигнала.

2. В настоящее время наименьшие искажения формы СШП импульсов дают датчики поля на основе ТЕМ-рупоров. Однако их размеры велики [1,2] и составляют не менее половины длины волны, определяющей нижнюю частоту отсечки. Чаще используют электрически короткие дипольные антенны [3], длина которых меньше (значительно меньше) половины минимальной длины волны в спектре регистрируемого импульса. Такие антенны имеют слабо зависящие от частоты диаграмму направленности и поляризационную характеристику, однако сильная частотная зависимость импеданса диполя приводит к сильным искажениям принимаемого сигнала. Резистивно-нагруженные диполи, плечи которых выполнены из материалов с высоким погонным сопротивлением, имеют более низкую частоту отсечки, чем обычные диполи. Благодаря более гладким частотным характеристикам собственного импеданса они существенно меньше искажают форму импульсов [4]. В работе [5]

диполем длину. Поэтому очень важно использовать в качестве датчика симметричный диполь, который соединяется с симметрирующим устройством *BU* симметричной линией не очень большой длины. Это позволяет ослабить синфазные помехи. При регистрации СШП импульсов сигналы помех, имеющих большие временные задержки, могут быть легко устранены в регистрирующем устройстве при выборе временного окна цифрового (стробоскопического) осциллографа *DO*. Относительно узкополосные сигналы, полезный и помехи, интерферируют и на выходе фидерной линии их суммарная амплитуда может меняться в широких пределах, что затрудняет, или даже исключает, проведение измерений амплитуды полезного сигнала. Это наблюдается даже при фиксированном положении диполя и изменении положения кабеля и ориентации его частей. Для СШП импульсных сигналов полезный сигнал и помехи разрешаются по временному запаздыванию при следующих условиях. Эффективная длительность сигнала должна быть в несколько раз меньше относительных задержек сигналов помех.

4. Наиболее распространённым датчиком СШП импульсов электромагнитного поля являются устройства фирмы PRODYN Technologies, Inc [6], один из вариантов которой показан на Рис. 2.

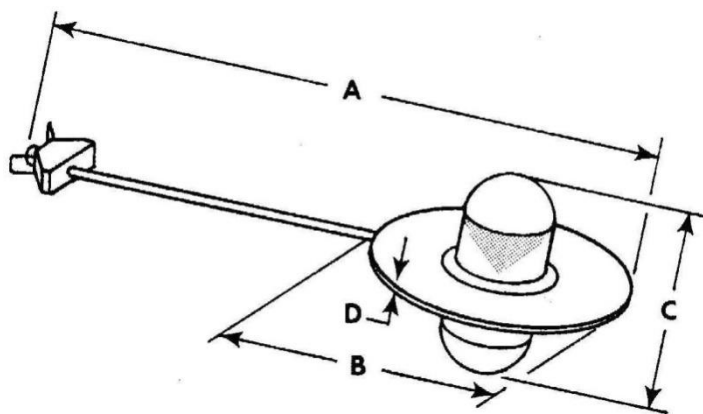


Рис. 2. Датчик импульсных электромагнитных поле AD-70 PRODYN:
 $A=38,6$ см, $D=0,32$ см.

Длина диполя $2l = C = 3,3$ см, диаметр экранированной полости в плоскости симметрии – $B = 7,6$ см. Время нарастания переходной характеристики около 0,11 нс, верхняя граница частотного диапазона – выше 3,5 ГГц, максимальная амплитуда выходного напряжения – до 1 кВ. При высоком качестве симметрирования эта конструкция обладает интересной особенностью. Наличие экрана в экваториальной плоскости, относительный диаметр которого $B/2l \geq 2,3$, сильно расширяет поляризационную характеристику. В некоторых случаях, когда сложно точно согласовать ориентацию диполя по отношению к вектору электрического поля, это очень полезное свойство. Но в случаях, когда нас интересуют и поляризационные свойства поля в точке регистрации или поляризационные характеристики источника излучения, такая конструкция затрудняет измерение указанных параметров.

Ниже предложена другая конструкция датчика поля [7], сохранившая поляризационные свойства собственно диполя (Рис. 3). Внутри цилиндрического стакана диаметром $D = 14$ мм крепится трёхслойная печатная плата, образующая две микрополосковые линии (МПЛ) *MS1* и *MS2* с общим электродом *GND* в плоскости симметрии стакана. МПЛ имеют волновые сопротивления 50 Ом и выступают от среза стакана приблизительно на величину D . К концам МПЛ припаяны два

цилиндрических электрода ($2l \approx 20$ мм) с удлинением около 1:6. Верхняя МПЛ нагружена чип-резистором $R = 50$ Ом, а нижняя соединена с выходным разъёмом X типа SMA .

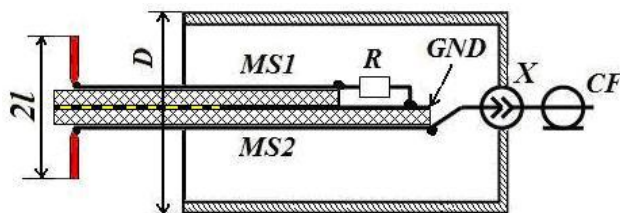


Рис. 3. Конструкция датчика поля.

5. Э.д.с., наводимая на входе электрически короткого диполя длиной $2l$, связана с напряженностью электрического поля в точке \vec{r} расположения датчика и выражается соотношением:

$$\varepsilon(t) \approx E(\vec{r}, t) \cdot l_\rho \cdot \cos\theta, \quad (1)$$

где $E(\vec{r}, t)$ – напряженность электрического поля в В/м,

$l_\rho = l \square \lambda_{\min}$ – действующая длина диполя,

λ_{\min} – минимальная длина волны в спектре исследуемого электромагнитного поля,

θ – угол между вектором $E(\vec{r}, t)$ и осью диполя (Рис. 4).

Спектр сигнала $\vec{S}(\vec{r}, \omega)$ в точке \vec{r} является преобразованием (рядом) Фурье $\vec{S}(\vec{r}, \omega) = F[E(\vec{r}, t)]$ и определяет спектр э.д.с. (1).

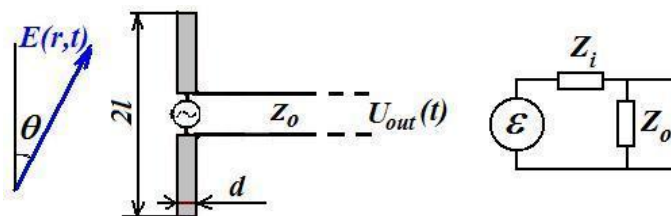


Рис. 4. Датчик поля и его эквивалентная схема.

Внутреннее сопротивление такого источника э.д.с. $\vec{Z}_i = R_i + jX_i$ представляет собой комплексное сопротивление излучения электрически короткого диполя. Поэтому

$$R_i \approx 20(kl)^2, X_i \approx -jZ_{00} \operatorname{ctg} kl \approx -jZ_{00}/kl \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ – волновое число,

$Z_{00} \approx 120[\ln(2l/d) - 1]$ – волновое сопротивление диполя,

d – диаметр проводника диполя ($2l/d \geq 3$).

В качестве диполя можно выбрать другую симметричную антенну (например, биконическую антенну), для которой известны (или измерены) частотные зависимости входного импеданса в максимально широком диапазоне частот.

Диполь соединяется с регистрирующим устройством симметричной фидерной линией длиной b с волновым сопротивлением \vec{Z}_0 , которое должно быть согласовано со стандартным входным сопротивлением регистрирующего устройства. Если постоянная

затухания фидерной линии $\alpha(\omega)$, то коэффициент передачи для спектра сигнал $\vec{S}(\vec{r}, \omega)$ ко входу регистратора будет равен:

$$\vec{K}(\vec{r}, \omega) \approx \frac{\vec{Z}_0 \exp(-\alpha b)}{\vec{Z}_0 + \vec{Z}_i(\omega)}. \quad (3)$$

Учитывая, что $R_i \ll Z_0$ и $R_i \ll Z_{0d}$, коэффициент передачи (3) принимает вид:

$$\vec{K}(\vec{r}, \omega) \approx \frac{Z_0 \exp(-\alpha b)}{Z_0 - jZ_{0d} \operatorname{ctg} kl}. \quad (4)$$

Тогда спектр сигнала на входе регистратора будет равен

$$\vec{S}_p(\vec{r}, \omega) = \vec{K}(\vec{r}, \omega) \cdot \vec{S}(\vec{r}, \omega) \cdot l \cdot \operatorname{Cos} \theta \approx \vec{S}(\vec{r}, \omega) \cdot l \cdot \operatorname{Cos} \theta \frac{Z_0 e^{-\alpha b}}{Z_0 - jZ_{0d} \operatorname{ctg} kl}. \quad (5)$$

Отсюда выразим спектр электрического поля в точке расположения датчика \vec{r} :

$$\vec{S}(\vec{r}, \omega) \approx \vec{S}_p(\vec{r}, \omega) e^{\alpha b} \frac{Z_0 - jZ_{0d} \operatorname{ctg} kl}{Z_0 \cdot l \cdot \operatorname{Cos} \theta} = \vec{S}_p(\vec{r}, \omega) e^{\alpha b} \frac{1 - j(Z_{0d}/Z_0) \operatorname{ctg}(\omega l/c)}{l \cdot \operatorname{Cos} \theta}. \quad (6)$$

Теперь легко получить искомую форму сигнала электрического поля, применив к (6) обратное преобразование Фурье:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = F^{-1} \left[\vec{S}(\vec{r}, t) \right]. \quad (7)$$

6. Результаты работы включают.

1. Анализ датчиков импульсных СШП полей на основе симметричного электрически короткого диполя и влияния условий регистрации на характеристики и конструктивные особенности таких датчиков.

2. Вариант конструкции датчика СШП импульсов электромагнитного поля длительностью более 0,1 нс и стандартными поляризационными характеристиками дипольной антенны.

3. Алгоритм обработки сигнала подобных датчиков, позволяющий восстановить исходную форму импульса электромагнитного поля.

Литература

1. J. D. Taylor (Ed). Ultra-wideband Radar Technology. CRC Press, 2000.
2. Ю. А. Андреев, А. М. Ефремов, В. И. Кошелев, Б. М. Ковальчук, В. В. Плиско, К. Н. Сухушин. Высокоэффективный источник мощных импульсов сверхширокополосного излучения наносекундной длительности // Приборы и техника эксперимента. 2011, № 6, с. 51–60
3. Е. В. Балзовский, Ю. И. Буянов, В. И. Кошелев. Векторная приемная антенна для измерения поляризационной структуры сверхширокополосных электромагнитных импульсов // 2005. Том 50. №8. Стр. 938-947.
4. J.D. Taylor (Ed). Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems, CRC Press, Boca Raton, FL, 1995
5. Е. В. Балзовский, Ю. И. Буянов, В. И. Кошелев. Активная антенна для измерения импульсных электрических полей // Известия ВУЗов, серия «Физика», №5, 2007, с.20-27.
6. <http://prodyntech.com/>
7. N. Chubinsky. The electromagnetic field probe for registration of ultrawideband pulses // Technical report «UWB Technology» of IEICE. Tokyo. 2008