

02;10;12

Дипольное излучение сильного электромагнитного поля

© К.А. Желтов

НИИ импульсной техники, Москва

Поступило в Редакцию 12 июля 2000 г.

Проведены измерения сильного электромагнитного поля, излучаемого проводником-диполем, через который протекает импульс тока высокой крутизны. Ток создается ультракоротким импульсом напряжения, формируемым в передающей (коаксиальной) линии пикосекундного сильноточного ускорителя электронов.

Дипольное излучение, как известно [1], обусловлено второй производной дипольного момента. Если под диполем понимать линейный проводник, длина которого l существенно меньше длины волны λ излучаемого электромагнитного поля, то вторая производная дипольного момента (ql , где q — электрический заряд), в сущности, является производной (крутизной) тока, текущего через проводник:

$$d^2(ql)/dt^2 = l(dI/dt). \quad (1)$$

Соответственно напряженность E электрического поля в направлении, перпендикулярном диполю, и на достаточном удалении от него ($r \gg l$) описывается соотношением, зависящим от крутизны тока в диполе:

$$E = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{l}{r} \cdot \frac{dI}{dr}, \quad (2)$$

здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м — магнитная проницаемость вакуума в системе СИ; l, m — длина проводника-диполя; I, A — ток в диполе; r, m — расстояние от диполя до точки наблюдения.

Выражение (1) позволяет оценить ту необходимую крутизну тока в диполе, при которой может быть достигнута наибольшая напряженность электрического поля в излучаемом видеоимпульсе. Критерием здесь может служить электрическая прочность воздуха вблизи диполя, т.е. та напряженность поля, при которой происходит электрический

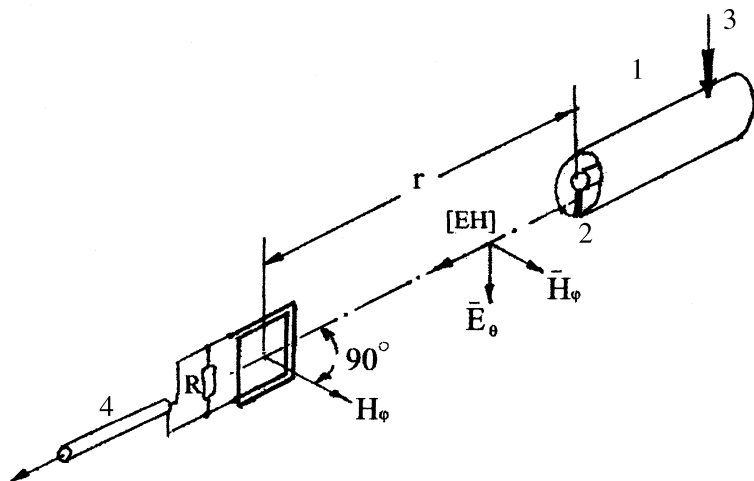


Рис. 1. Дипольный излучатель и схема измерений напряженности электромагнитного поля видеоимпульса: 1 — коаксиальная линия, 2 — проводник-диполь, 3 — делитель напряжения, 4 — радиочастотный кабель, R — шунтирующее сопротивление "рамки".

пробой. Электрическая прочность существенно образом зависит от длительности воздействующего на изоляцию импульса напряжения (напряженности поля). Минимальная длительность обычно обусловлена временем коммутации разрядников, используемых в формирующих устройствах. На устройствах с мегавольтным напряжением, в частности в передающих линиях пикосекундных сильноточных ускорителей электронов [2], реально достижимая длительность составляет $\sim 10^{-10}$ с. Ей соответствует, согласно [3], электрическая прочность воздуха $\sim 10^7$ В/м. Принимая это значение за допустимый уровень электрического поля вблизи диполя, конкретно для $r \approx l$ (компоненты напряженности поля, пропорциональные r^{-2} и r^{-3} , не учитываются), приходим к необходимой крутизне возбуждающего тока. Согласно (2), эта крутизна будет равна $(dI/dt)_{\max} \sim 10^{14}$ А/с. Именно такой крутизне тока отвечает излучение сильного электромагнитного поля, в котором напряженность вблизи диполя достигает порога электрической прочности воздуха.

Схематический вид устройства, генерирующего дипольное излучение, показан на рис. 1. По коаксиальной линии (КЛ) распространяется падающий импульс напряжения U_{inc} длительностью $\sim 10^{-10}$ с. Достигая конца КЛ, где находится линейный проводник-диполь (ДП) длиной 1.5 см, перемикающий проводники линии, импульс U_{inc} отражается с переменной полярности. При этом в диполе возникают возбуждающий ток I (ток короткого замыкания) и сопутствующее ему излучение электромагнитного видеоимпульса. Возбуждающий ток в данном случае следует такому соотношению:

$$I = (U_{inc} - U_{ref})/Z_L, \quad (3)$$

где U_{inc} , U_{ref} — падающий и отраженный импульсы напряжения, Z_L — волновое сопротивление коаксиальной линии.

Регистрация электромагнитного видеоимпульса в принципе может быть осуществлена двумя способами. Первый — по возбуждающему току, протекающему в диполе, и его производной. Для этого используется емкостной делитель \mathcal{Z} , идентичный описанному в [4], который устанавливается вблизи диполя на расстоянии, соответствующем ~ 1 ns пробега электромагнитной волны. При этом на одной осциллограмме регистрируются падающий и отраженный импульсы напряжения и определяются соответствующие им импульсы тока.

Второй способ — непосредственное измерение напряженности магнитного поля H_φ как вблизи диполя ($r \sim \lambda$), так и на достаточно большом расстоянии ($r \gg \lambda$) от него. В качестве детектора напряженности магнитного поля применена шунтированная сопротивлением R одно-, двухвитковая "рамка", преобразующая электромагнитное излучение в импульс напряжения. "Рамка", представляющая собой квадратную катушку индуктивности, ориентирована в плоскости диполя. Размер "рамки" (~ 1 см) выбран с соблюдением условия квазистационарности, т.е. существенно меньше характерной длины волны видеоимпульса. Измеряемый сигнал "рамки" подводится к осциллографу по радиочастотному кабелю.

Напряженность электрического поля E_θ в волновой зоне ($r \gg \lambda$) по форме импульса идентична напряженности H_φ и связана с ней волновым сопротивлением свободного пространства (120π):

$$E_\theta = 120\pi H_\varphi. \quad (4)$$

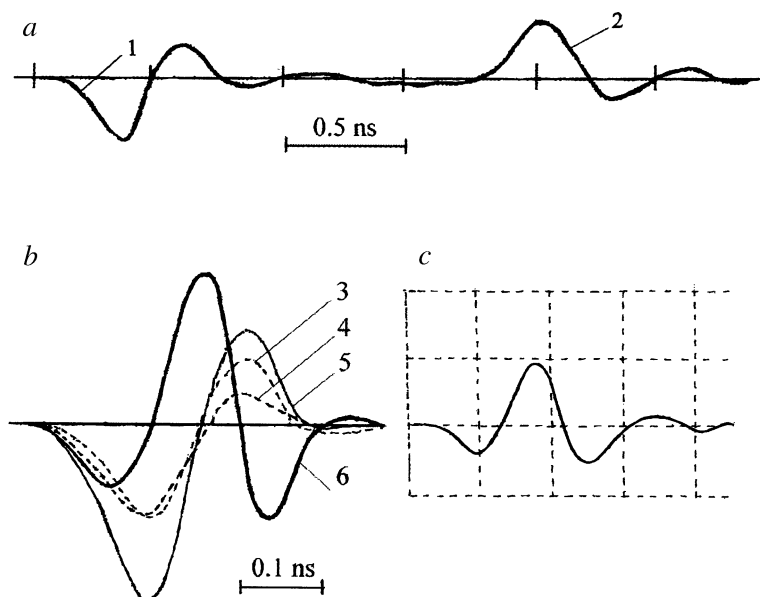


Рис. 2. *a* — импульсы напряжения в линии — падающий (1) и отраженный (2); *b* — импульсы тока в линии — падающий (3) и отраженный (4) и ток в диполе (5), импульс излучения (6), построенный по производной тока; *c* — импульс излучения (видеоимпульс), зарегистрированный рамкой, метки 0.5 ns.

Падающий и отраженный импульсы напряжения в коаксиальной линии показаны на рис. 2, *a*. Знакопеременная полярность импульсов обусловлена особенностями формирующего устройства. Максимальная амплитуда первых всплесков импульсов ~ 350 kV. Падающий и отраженный импульсы токов, имеющие одноименную полярность (рис. 2, *b*), суммируются в диполе, формируя возбуждающий ток с амплитудой ~ 13 kA. Производная этого тока показывает форму излучаемого видеоимпульса.

Непосредственные измерения электромагнитного поля на расстоянии 2 m от диполя с помощью "рамки" показаны на рис. 2, *c*. Эти измерения свидетельствуют об идентичности формы видеоимпульса и производной возбуждающего тока в диполе. Некоторое различие — возросшая длительность видеоимпульса — объясняется сильным за-

туханием в измерительном канале. В нем был применен "тонкий" ($\sim 1.2\text{ mm}$) радиочастотный кабель длиной $\sim 10\text{ m}$ с полушириной импульсной характеристики $\sim 0.5\text{ ns}$ [5], сравнимой с длительностью возбуждающего тока.

По оценке вследствие ослабления сигнала в кабеле происходят примерно двухкратное снижение его амплитуды и некоторое увеличение длительности. Амплитуда второго всплеска видеоимпульса с учетом поправки на ослабление в кабеле составляет $\sim 50\text{ kV/m}$. В пересчете к ближней зоне по соотношению (2), например для $r \approx 0.1\text{ m}$, напряженность поля оценивается $\approx 1\text{ MV/m}$. Характерная длина волны, определяемая по квазипериоду колебаний тока в диполе, близка к значению $\sim 15\text{ cm}$.

Экспериментальная крутизна тока в диполе и напряженность поля примерно соответствуют предельным значениям. Однако не исключено получение и более высоких значений, так как в передающих линиях пикосекундных сильноточных ускорителей электронов реально достижения и более высокая крутизна тока как за счет увеличения амплитуды падающего импульса напряжения, так и путем снижения волнового сопротивления линии.

Список литературы

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Физматиз, 1962. С. 213.
- [2] Желтов К.А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 115.
- [3] Штак В.Г., Яландин М.И. и др. // ДАН. 1999. Т. 365. № 1. С. 50–53.
- [4] Желтов К.А., Турундаевская И.Г., Шалиманов В.Ф. // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 6. С. 89–94.
- [5] Глебович Г.В., Ковалев И.П. Широкополосные линии передачи импульсных сигналов. М.: Сов. радио, 1973. С. 16–21.