УДК 537.86/.87+621.371+621.396.94

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ СВЕРХКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. Г. Усыченко¹*, А. С. Усыченко², Л. Н. Сорокин¹

 1 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 2 Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Показано, что для использования наибольшей доли энергии униполярного сверхкороткого электрического импульса его длительность и форма, а также параметры передающей антенны, должны быть определённым образом связаны с центральной частотой и полосой пропускания приёмника. Чем шире полосы частот излучения и приёмника, тем больше искажения, вносимые эффектами распространения в форму спектра принятого излучения.

введение

В последние десятилетия интенсивно развивается техника генерирования униполярных сверхкоротких электромагнитных импульсов [1–4], которые находят широкое применение в различных технических приложениях. Исследуются и разрабатываются антенны [5–7], оптимизируются параметры излучателей сверхкоротких импульсов [8], развиваются методы их регистрации [9]. В ряде практических случаев важной характеристикой таких излучателей является не столько форма излучённого импульса, сколько энергия в том диапазоне частот, к которым приёмное устройство наиболее восприимчиво. Это требует оптимальной привязки к полосе частот приёмника как длительности и формы сверхкороткого электромагнитного импульса, так и полосы пропускания антенны излучателя. Качественному решению этой задачи, претендующему на объяснение наиболее общих явлений, посвящена настоящая статья.

1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Решать данную задачу можно по-разному. Чаще всего используют метод интеграла наложения или спектральный метод. В первом случае (см., например, [10, 11]) ищут зависимость электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ антенны в точках, определяемых радиусом-вектором \mathbf{r} , используя для этого операцию свёртки по времени:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}_{\mathrm{a}}(t,\mathbf{r}) \otimes U(t).$$

Здесь U(t) — сигнал, поступающий в антенну, $\mathbf{E}_{\mathbf{a}}(t, \mathbf{r})$ — наблюдаемая в точке \mathbf{r} реакция антенны на дельта-импульс $\delta(t)$, т. е. импульсная переходная характеристика антенны. Вычислив $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, нетрудно определить спектр сигнала.

Однако в таком подходе встречаются трудности, связанные с тем, что точное определение функции $\mathbf{E}_{a}(t, \mathbf{r})$ зависит от вида антенны и способа её возбуждения и само по себе представляет собой сложную задачу. Но если, как в нашем случае, требуется найти только энергетический спектр сигнала, то намного проще использовать спектральный метод, требующий знания лишь амплитудно-частотной характеристики антенны безотносительно к её виду. Используем следующую процедуру.

^{*} usychenko@rphf.spbstu.ru

Пусть U(t) — напряжение произвольного по форме сверхкороткого электромагнитного импульса на сопротивлении нагрузки, равном волновому сопротивлению Z_0 тракта. Найдём временны́е зависимости тока $I(t) = U(t)/Z_0$ и мощности P(t) = U(t)I(t), а по последней — энергию импульса

$$W_U = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t) \, \mathrm{d}t = \frac{1}{Z_0} \int_{-\infty}^{+\infty} U^2(t) \, \mathrm{d}t.$$
(1)

Определим фурье-спектр

$$\dot{S}_U(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) \exp(-j\omega t) \,\mathrm{d}t \tag{2}$$

и энергетический спектр импульса

$$S_W(\omega) = \dot{S}_U(\omega)\dot{S}_U^*(\omega) = |\dot{S}_U(\omega)|^2 = S_U^2(\omega).$$
(3)

Здесь $\dot{S}_U^*(\omega)$ — спектральная функция, комплексно сопряжённая функции $\dot{S}_U(\omega)$.

Согласно равенству Парсеваля, при $Z_0 = 1$ энергия (1) выражается через энергетический спектр импульса:

$$W_U = \int_{-\infty}^{+\infty} U^2(t) \, \mathrm{d}t = 2 \int_{0}^{\infty} S_U^2(f) \, \mathrm{d}f.$$
(4)

Здесь вместо «круговой» частоты ω использована физическая частота $f = \omega/(2\pi)$. Однако удобнее безразмерная частота $f\tau$, равная произведению физической частоты на длительность импульса τ . В таком представлении импульсы с одинаковыми формами, но разными длительностями имеют одинаковую форму спектра $S_U^2(\tau f)$, что следует из теоремы о спектре сигнала, масштабированного по времени. Действительно, спектральная плотность импульса

$$\dot{S}_U(\omega) = \int_0^\tau U(t) \exp(-j\omega t) \,\mathrm{d}t.$$
(5)

Введём безразмерное время t/τ . Подставив $V(t,\tau) = U(t/\tau)$ в (5), определим его спектральную плотность

$$\dot{S}_V(\omega,\tau) = \int_0^\tau V(t,\tau) \exp(-j\omega t) \,\mathrm{d}t = \tau \int_0^1 U(t/\tau) \exp(-j\omega\tau t/\tau) \,\mathrm{d}t/\tau = \tau \dot{S}_U(\omega\tau).$$

Переходя к энергетическим спектрам, получим $S_V^2(f,\tau) = \tau^2 S_U^2(f\tau)$. Отсюда следует, что у импульсов $V(t,\tau)$ с одинаковыми формами, но с разными длительностями энергетические спектры, нормированные на их собственные максимальные значения $[S_V^2(f,\tau)]_{\text{max}}$ даются формулой

$$S_V^2(f,\tau) \Big/ \big[S_V^2(f,\tau) \big]_{\max} = S_U^2(f,\tau),$$

т. е. описываются одной функцией $S_U^2(f,\tau)$, зависящей от безразмерной частоты $f\tau$. Практически для этого достаточно ось частот f нормированного энергетического спектра импульса заменить осью $f\tau$. Под длительностью τ будем понимать эквивалентную длительность импульса,

В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин



Рис. 1. Форма тестовых импульсов с одинаковыми эквивалентными длительностями: сплошная кривая — импульс с генератора, пунктирная кривая — гауссов импульс, штрихпунктирная кривая прямоугольный импульс



Рис. 2. Модули спектров генераторного (сплошная кривая), гауссова (пунктир) и прямоугольного (штрихпунктир) импульсов. Энергия импульса с генератора принята за 1, энергия гауссова импульса равна 1,21, прямоугольного — 1,72

вычисляемую по определённому правилу. Каждое правило даёт своё значение τ , что влияет на количественные соотношения величин, но качественный вид зависимостей от этого не меняется.

В качестве тестовых будем использовать три импульса с разными формами: изображённый на рис. 1 импульс твёрдотельного генератора FPG-P, созданного в ЗАО «FID-технология» [12], а также равные ему по амплитуде $U_{\rm m}$ и эквивалентной длительности τ прямоугольный импульс и гауссов импульс

$$U(t) = U_{\rm m} \exp[-t^2/(2\sigma^2)].$$

Здесь параметр σ имеет смысл длительности импульса, определяемой на уровне $\exp(-1/2) = 0,606$ от амплитуды $U_{\rm m}$ [13].



Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики G фильтров, моделирующих антенну. Кривая 1 соответствует коэффициенту перекрытия br = 3, 2 - br = 6, 3 - br = 9, 4 - br = 12

116

Из теории спектров [13] известно, что спектральная плотность униполярного импульса на нулевой частоте равна площади импульса. Отсюда следует правило нахождения эквивалентной длительности импульса, если известны его амплитуда и площадь. Длительность генераторного импульса,

$$\tau = \frac{1}{U_{\rm m}} \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) \,\mathrm{d}t,$$

оказавшуюся равной $\tau \approx 0.7$ нс, мы определили как длительность прямоугольного импульса, у которого амплитуда и площадь такие же, как амплитуда $U_{\rm m}$ и геометрическая площадь у генераторного импульса (отрицательный выброс на рис. 1 мы превратили в положительный). Эквивалентную длительность гауссова импульса мы

сделали равной $\tau \approx 0.7$ нс, подбирая параметр σ . Модули $|\dot{S}_U(\omega)|$ нормированных на максимальное значение спектров тестовых импульсов изображены на рис. 2. В подписи к нему указано, как

В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин

соотносятся энергии тестовых импульсов.

Частотную зависимость коэффициента усиления антенны по мощности G(f) мы полагали симметрично снижающейся при удалении от центральной частоты f_0 , значение которой может быть произвольным. На центральной частоте коэффициент усиления имеет максимальное значение $G(f_0) = 1$. Минимальное значение G(f) = 0 достигается на частотах f = 0 и $f \ge 2f_0$. Введение аппроксимации $G(f \ge 2f_0) = 0$ оправдано низким удельным весом высокочастотных составляющих в спектрах импульсов, что видно из рис. 2.

Зависимость $G(f/f_0)$, выраженную через относительные частоты, мы моделировали смещённой на $f/f_0 = 1$ функцией Гаусса, которую умножали на симметричную относительно вертикали $f/f_0 = 1$ оконную функцию Тьюки. В нашей задаче вид этой функции ассоциируется с равнобедренной трапецией, имеющей скруглённое верхнее основание, единичную высоту и нулевые значения на частотах $f/f_0 = 0$ и $f/f_0 = 2$.

Потерями энергии в антенне пренебрегали. Относительную полосу пропускания $\Delta f/f_0 = (f_{\rm h} - f_{\rm l})/f_0$ мы меняли, подбирая параметр σ в функции Гаусса и длину верхнего основания трапеции. Верхняя $f_{\rm h}$ и нижняя $f_{\rm l}$ частоты определены по уровню половинной мощности от максимальной и связаны с центральной частотой f_0 соотношением $f_0 = (f_{\rm h} + f_{\rm l})/2$. Ширину полосы пропускания мы характеризовали коэффициентом перекрытия по диапазону $br = f_{\rm h}/f_{\rm l}$. Определённые по описанной методике амплитудно-частотные характеристики моделей антенн со значениями br == 3; 6; 9; 12 изображены на рис. 3.

2. ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТОТА АНТЕННЫ И ДОЛЯ ИЗЛУЧЁННОЙ ЭНЕРГИИ

На рис. 4 кривыми гиперболического вида изображены зависимости относительной доли полной энергии (4) тестовых импульсов

$$\delta W_{\rm h}(\tau f) = \frac{2}{W_U} \int_{f\tau}^{\infty} S_U^2(\tau f) \,\mathrm{d}(\tau f),\tag{6}$$

содержащейся в их энергетических спектрах в области нормированных частот от τf до $+\infty$, $\tau f \ge 0$. Начальные участки всех кривых быстро спадают с ростом τf . Это означает, что основная

Рис. 4. Монотонно спадающие кривые — зависимости относительной доли (6) энергии импульсов в полосе частот от τf до $+\infty$, $\tau f \ge 0$. Кривые с одиночными максимумами описывают амплитудно-частотную характеристику G антенны с br = 12, настроенной на такую центральную частоту, при которой обеспечивается излучение максимальной доли энергии импульсов. Сплошные кривые — для импульса с генератора ($\tau f_{opt} = 0.21$, $W_{max}^{osc} = 0.65$), пунктирные кривые — для гауссова импульса ($\tau f_{opt} = 0.33$, $W_{max}^{gauss} = 0.69$), штрихпунктирные кривые — для прямоугольного импульса ($\tau f_{opt} = 0.4$, $W_{max}^{rect} = 0.64$)



В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин



Рис. 5. Зависимость излучаемой антенной доли энергии импульса δW от частоты настройки антенны τf_0 . Сплошная толстая линия — для импульса с генератора при коэффициенте перекрытия br = 12 (тонкая — при br = 3), пунктирная — для гауссова импульса при br = 12 (тонкая — при br = 3), штрихпунктирная — для прямоугольного импульса при br = 12 (тонкая — при br = 3)

доля энергии содержится в низкочастотной области от 0 до τf :

$$\delta W_{\rm l}(\tau f) = rac{2}{W_U} \int\limits_0^{f au} S_U^2(\tau f) \, {
m d}(\tau f) = 1 - \delta W_{
m h}(\tau f).$$

Например, в спектрах импульса с генератора и гауссова импульса около 90 % энергии (см. уровень ординаты $\delta W_{\rm h}(\tau f) = 0,1$) содержится в диапазоне нормированных частот $0 \le \tau f \le 0,6$; у прямоугольного импульса — в диапазоне $0 \le \tau f \le 1$.

На рис. 4 кривые с одиночным максимумом описывают амплитудно-частотную характеристику са́мой широкополосной антенны (br = 12), нормированная центральная частота $\tau f_0 = \tau f_{opt}$ которой выбрана так (см. значения τf_{opt} в подписи), чтобы в полосу пропускания попадала наибольшая доля энергии импульса (см. в подписи значения W_{max} для каждого из импульсов, которые воспроизведены также в нижней строке табл. 1). Напомним, что при постоянном коэффициенте перекрытия br увеличение центральной частоты τf_0 настройки антенны сопровождается увеличением её верхней граничной частоты, равной $2\tau f_0$, что хорошо видно из этого рисунка. Расчёты показали, что при изменении коэффициента перекрытия $br = f_h/f_1$ нормированная центральная частота τf_{opt} смещается незначительно, меняясь в третьем–втором знаке после запятой.

118 В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин

В табл. 1 представлены максимальные значения доли

$$\delta W(\tau f) = \frac{2}{W_U} \int_0^\infty S_U^2(\tau f) G(\tau f) \,\mathrm{d}(\tau f)$$

полной энергии (4) импульсов, излучаемой оптимально настроенными антеннами с разными значениями br. Видно, что у импульсов с разными формами, но одинаковой эквивалентной длительностью, эти значения близки. Однако часто́ты τf_{opt} для импульсов с разными формами различаются, см. подпись к рис. 4. Таким образом, для излучения наибольшей энергии униполярного сверхкороткого электромагнитного импульса нужны антенны, настроенные на оптимальную частоту τf_{opt} , которая определяется в основном длительностью и в меньшей степени — формой импульса.

Таблица 1. Максимальная доля энергии импульсов W_{max} на выходе передающих антенн, различающихся коэффициентом перекрытия br. Верхний индекс osc соответствует импульсу с генератора, gauss — гауссовому импульсу, rect — прямоугольному импульсу

1	1	TIZOSC	TT7gauss	TTrect
	br	$W_{\rm max}$	$W_{\rm max}$	$W_{\rm max}$
	3	0,38	$0,\!38$	$0,\!36$
	6	$0,\!58$	$0,\!59$	$0,\!56$
	9	$0,\!63$	$0,\!66$	$0,\!61$
	12	$0,\!65$	$0,\!69$	$0,\!64$

Отстройка антенны от оптимальной частоты сопровождается быстрым снижением доли излучаемой энергии δW (см. рис. 5). При этом темп снижения тем выше, чем меньше коэффициент перекрытия br у антенны. Это видно из сравнения хода кривых, изображённых толстыми и тонкими линиями.

Для оценки количества энергии, излучаемой в области высоких частот, некоторые авторы (см., например, [14]) предлагают использовать производную от импульса по времени. Если у импульса длительность τ_1 переднего фронта намного меньше длительности τ самого́ импульса, то основной вклад в характерное значение производной даёт передний фронт, длительность τ_1 которого и используют в последующих расчётах. Оценим влияние параметра τ_1 на структуру энергетического спектра. За основу возьмём импульс генератора FPG-P (см. рис. 1), у которого длительность τ_1 переднего фронта между уровнями 0,1 и 1 от максимума равна 0,22 нс, а отношение $\tau_1/\tau \approx 0,31$.

На рис. 6 представлена рассчитанная по формуле (6) доля энергии $\delta W_{\rm h}$, приходящаяся на область частот от τf до $+\infty$, для четырёх импульсов, различающихся длительностями переднего



Рис. 6. Влияние длительности τ_1 переднего фронта импульса с генератора на долю энергии в полосе частот от τf до $+\infty$. Сплошная кривая соответствует нулевой длительности τ_1 , пунктирная кривая — $0.5\tau_1$, штрихпунктирная — τ_1 , точечная — $2\tau_1$

фронта τ_1 . Энергия у всех импульсов одинаковая и равна энергии реального импульса. Равенство энергий достигалось посредством растяжения заднего фронта. Видно, что в области частот $\tau f \leq 0.3$ все зависимости сливаются. Это означает, что вариации длительности переднего фронта τ_1 , малой по сравнению с длительностью импульса τ , слабо влияют на количество энергии, излучаемой оптимально настроенной антенной: эта энергия сосредоточена в основном в низкочастотных составляющих спектра, связанных с длительностью τ всего импульса. Вариации параметра τ_1 заметно влияют лишь на уровень высокочастотных составляющих в спектре. Но относительная

В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин

доля сосредоточенной в них энергии быстро снижается при увеличении частоты и на частотах $\tau f > 1$ не превышает 8 % даже у импульса с нулевой длительностью переднего фронта.

3. ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ



Рис. 7. Тонкая линия — амплитудно-частотная характеристика G передающей (и приёмной) антенны с br = 12, настроенной на оптимальную частоту $\tau f_{opt} = 0,21$. Штриховая линия — энергетический спектр импульса с генератора на выходе передающей антенны W_t . Толстая сплошная линия — энергетический спектр импульса на выходе приёмной антенны $W_r(f)$. Доля энергии сверхкороткого электромагнитного импульса, попавшая во входной тракт приёмника, равна 0,013 (при r = 1 м)

Рассмотрим вопрос о том, как меняется форма энергетического спектра импульса при его распространении через свободное пространство. За основу возьмём формулу «идеальной радиопередачи»

$$P_{\rm r} = \left(\frac{c}{4\pi fr}\right)^2 G_{\rm r} G_{\rm t} P_{\rm t},\tag{7}$$

осуществляемой на частоте f в условиях, когда передающая и приёмная антенны нацелены друг на друга [15]. В этом выражении $P_{\rm t}$ — мощность излучения антенны передатчика, $P_{\rm r}$ — оптимальная мощность, передаваемая антенной приёмника в согласованный тракт, $G_{\rm t}$ и $G_{\rm r}$ — коэффициенты усиления антенн на частоте f электромагнитной волны, c — скорость света, r — расстояние между антеннами. Коэффициент

$$[c/(4\pi rf)]^2$$
 (8)

можно рассматривать как весовой коэффициент, характеризующий эффекты распространения. При использовании одиночных сверхкоротких электромагнитных импульсов в формуле (7) вместо мощностей $P_{\rm r}$ и $P_{\rm t}$ периодического колебания должны фигурировать энергетические спектры

импульса (3), занимающего широкую полосу частот. Формула (7) справедлива, если расстояние между антеннами удовлетворяет условию дальней зоны излучения. Полагаем, что это условие выполняется для всех спектральных составляющих излучённого сигнала.

Количество энергии, попадающей во входной тракт приёмника, зависит от амплитудно-частотных характеристик фильтров, моделирующих коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн, а также от расстояния r между антеннами. Полагаем антенны одинаковыми. Во избежание появления дополнительных числовых коэффициентов, не имеющих принципиального значения, при расчётах будем полагать r = 1 м. С учётом использованных приближений найдём энергию сверхкороткого электромагнитного импульса, попавшую в тракт приёмника:

$$W_{\rm r} = \left(\frac{c}{4\pi}\right)^2 \int_0^\infty \frac{2S_U^2(f)}{f^2} G^2(f) \,\mathrm{d}f.$$
(9)

Здесь $2S_U^2(f)$ — плотность энергетического спектра (3) импульса как функция частоты $f, G^2(f)$ — квадрат коэффициента усиления антенн как функция частоты f.

На рис. 7 изображён рассчитанный по формуле $W_t(f) = 2S_U^2(f)G_t(f)$, нормированный на максимальное значение и приведённый к безразмерной частоте $f\tau$ энергетический спектр сверхкороткого электромагнитного импульса с генератора FPG-P, излучаемого широкополосной (br = 12)

В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин



Рис. 8. То же, что на рис. 7, но передающая антенна с br = 12 настроена на частоту $\tau f_0 = 0.5$, доля энергии сверхкороткого электромагнитного импульса, попавшая во входной тракт приёмника, равна 0,004 (при r = 1 м)



Рис. 9. То же, что на рис. 7, но передающая и приёмная антенны с br = 12 настроены на частоту $\tau f_0 = 0,077$, при которой энергия на выходе приёмной антенны максимальна. Доля энергии сверхкороткого электромагнитного импульса, попавшая во входной тракт приёмника, равна 0,036 (при r = 1 м)

антенной, настроенной на оптимальную частоту $\tau f_{opt} = 0,21$. Изображён также рассчитанный по формуле $W_r(f) = 2S_U^2(f)G^2(f)/f^2$, нормированный на максимальное значение и приведённый к безразмерной частоте $f\tau$ спектр на выходе такой же приёмной антенны, настроенной на частоту $\tau f_0 = 0,21$. Видно, что под влиянием множителя $1/f^2$, входящего в коэффициент (8), энергетический спектр импульса во входном тракте приёмника существенно отличается от спектра импульса, излучаемого антенной передатчика: возрастает относительная доля низкочастотных составляющих, и максимум спектра смещается в область низких частот. Трансформация спектров означает, что временная форма импульса на выходе передающей и приёмной антенн также различна. Очевидно, что влияние эффектов распространения (при неизменном расстоянии r между антеннами) тем значительнее, чем шире полоса пропускания антенн. Поступившая в тракт приёмника энергия, рассчитанная по формуле (9), составляет (см. число в подписи к рис. 7) 1,3 % от полной энергии (4) сверхкороткого электромагнитного импульса.

На рис. 8 такие же зависимости приведены для случая, когда частота настройки антенн сдвинута к более высоким частотам, конкретно $\tau f_0 = 0.5$. Изменения формы спектров менее значительны, чем на рис. 7, но доля энергии сверхкороткого электромагнитного импульса на выходе приёмной антенны (см. подпись) уменьшилась в 3,2 раза.

Из рис. 7 следует, что долю энергии, попадающей в приёмник, можно повысить, если частоту настройки антенн сместить в область более низких частот. На рис. 9 антенны, имеющие коэффициент перекрытия br = 12, настроены на частоту $\tau f_0 = 0,077$, при которой энергия сигнала на выходе приёмника достигает максимального возможного значения, которое, как видно из подписи, почти втрое больше, чем на рис. 7.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчёты показывают, что применение излучателей электромагнитных импульсов, возбуждаемых генераторами униполярных сверхкоротких электромагнитных импульсов, может оказаться

В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин

энергетически эффективным, если длительность и, в меньшей степени, форма импульса тесно связаны с центральными частотами и полосами пропускания антенн как приёмника, так и излучателя.

При использовании сверхширокополосных сигналов, излучаемых широкополосными антеннами, возбуждаемыми сверхкороткими униполярными импульсами, в ряде случаев следует принимать во внимание влияние эффектов распространения, не играющих заметной роли при использовании узкополосных сигналов.

Авторы благодарны В.П. Акимову, высказавшему полезные замечания при чтении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Месяц Г.А., Яландин М.И. // УФН. 2005. Т. 175, № 3. С. 225.
- 2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 705 с.
- 3. Белоконь И. Н., Гончаров А. Н., Иванов Е. В., Кудряшов А. С. // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 1. С. 49.
- 4. Слюсар В. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2002. № 5. С. 60.
- 5. Костиков Г. А., Одинцов А. Ю., Саломатов М. И., Сугак М. И. Антенны в режиме излучения негармонических сигналов. С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2012. 172 с.
- 6. Wiesbeck W., Adamiuk G., Sturm C. // Proc. IEEE. 2009. V. 97, No. 2. P. 372.
- 7. Duroc Y. // Progr. Electromag. Res. B. 2010. V. 21. P. 69.
- 8. Мещеряков И.И. Оптимизация параметров излучателей сверхкоротких импульсов: Дисс....канд. физ.-мат. наук. Воронежский госуниверситет, 2012. 150 с.
- 9. Сахаров К. Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: Моск. гос. ин-т электрон. матем., 2006. 159 с.
- 10. Skulkin S. P., Turchin V. I. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1999. V. 47. P. 929.
- 11. Артеменко А.А., Скулкин С.П. // Вестн. Нижегород. ун-та. Сер. «Радиофизика». 2012. № 1 (1). С. 56.
- 12. http://fidtechnology.com.
- 13. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1977. 608 с.
- 14. Осташев В. Е., Ульянов А. В., Федоров В. М., Янковский Б. Д. // Научн. тр. Ин-та теплофиз. экстрем. состоян. ОИВТ РАН. Вып. 4. М.: ОИВТ РАН, 2002. С. 67.
- 15. Мейнке Х., Гундлах Ф.В. Радиотехнический справочник. Т.1. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1960. 416 с.

Поступила в редакцию 12 марта 2014 г.; принята в печать 24 февраля 2015 г.

ENERGY CHARACTERISTICS OF RADIATORS OF ULTRASHORT ELECTROMAGNETIC PULSES

V. G. Usychenko, A. S. Usychenko, and L. N. Sorokin

It is shown that to use maximum part of the energy of a unipolar ultrashort electric pulse, its duration and shape, as well as the transmitting antenna parameters should in a certain manner be related to the receiver central frequency and bandpass. Distortions introduced by the propagation effects to the received-radiation spectrum shape increase with broadening the radiation and receiver frequency bands.

В. Г. Усыченко, А. С. Усыченко, Л. Н. Сорокин