

Импульсные антенны: особенности проектирования

А.Н. Титов, А.Н.Грибанов

ОАО «НИИ Приборостроения им.В.В. Тихомирова», Россия, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д.3
niki@nio11.niip.ru

Целью работы является изложение особенностей, отличающих передающие и приемные импульсные антенны от антенн традиционных типов. Показана роль согласования, размеров, конфигурации импульсной антенны и джоулевых потерь в ней на качество преобразования сверхкоротких импульсов возбуждения в сверхкороткие импульсы электромагнитного поля и наоборот. Даны общие рекомендации по проектированию импульсных антенн.

The objective of this paper is to describe specific properties of transmitting and receiving impulse antennas that distinguish them from conventional antennas. It demonstrates the impact of impulse antenna matching, dimensions, configuration and Joule losses upon the quality of ultra-short drive pulse conversion to electromagnetic ultra-short pulses and vice versa. General recommendations are given with regard to impulse antenna design.

Введение

Развитие теории и практики сверхкороткоимпульсных радиоэлектронных систем потребовало разработки и освоения новых принципов проектирования практически всех устройств системы, в том числе и устройств, преобразующих сверхкороткие электрические импульсы напряжения и тока в сверхкороткие импульсы электромагнитного поля и наоборот. Такие устройства представляют собой специфический класс антенн, которые, по нашему мнению, следует называть импульсными антеннами. Эпюры электрического и магнитного полей в сверхкоротком электромагнитном импульсе представляют собой ограниченную во времени знакопеременную функцию с небольшим числом пересечений оси времени.

Для описания импульсных антенн непригодны характеристики, используемые в традиционной антенной технике. Например, в случае импульсных антенн являются неопределенными или непригодными такие характеристики как коэффициент усиления, амплитудная и фазовая диаграммы направленности, коэффициент стоячей волны и даже длина волны и частота. Такое положение затрудняет сравнение качества и характеристик различных импульсных антенн, оптимизацию импульсных антенн, разработку методик экспериментальных исследований и проектирование системы в целом. Например, в уравнении, описывающем дальность действия радиолокатора (т.н. основное уравнение радиолокации) все входящие в него параметры определены для синусоидального сигнала конкретной частоты с длительностью, на много порядков превышающей период колебания этой частоты. Многочисленные попытки воспользоваться этим уравнением для случая сверхкоротких зондирующих импульсов оставляют простор для сомнений в надежности подобных расчетов.

Целью настоящей работы является изложение тех особенностей импульсных антенн, которые существенно отличают их от антенн традиционных типов, а также изложение общих рекомендаций, относящихся к проектированию импульсных антенн

1. Особенности импульсных антенн и сигналов

В линию связи, в которой используются сверхкороткоимпульсные сигналы, входит передающая импульсная антенна, среда распространения электромагнитного возмущения, содержащая рассеивающие и отражающие объекты, и приемная импульсная антенна. Существенным моментом является то обстоятельство, что эпюра электромаг-

нитного сигнала, излученного передающей импульсной антенной, существенно отличается от эюры возбуждающего эту антенну электрического сигнала. Более того, эюра электромагнитного сигнала, излученного в различных направлениях, оказывается различной. В свою очередь, эюра напряжения на нагрузке приемной импульсной антенны также зависит от направления прихода электромагнитного импульса и отличается от эюры падающего на антенну электромагнитного импульса. Эюра распространяющегося в пространстве электромагнитного импульса в общем случае зависит от свойств среды распространения и расстояния от передающей импульсной антенны и, естественно, меняется при отражении и рассеивании сверхкороткого электромагнитного импульса. В случае свободного пространства электромагнитный импульс, распространяющийся в определенном направлении, сохраняет временную структуру (эюру) электрического и магнитного полей, в то время как амплитудный масштаб изменяется по мере удаления от передающей импульсной антенны как $1/r$.

Основные особенности обсуждаемых процессов можно сформулировать следующим образом:

- При любой форме электрического импульса, возбуждающего передающую импульсную антенну, в любой точке окружающего пространства среднее по времени значение электрического и магнитного полей в излученном электромагнитном импульсе равно 0. Это означает, что постоянная составляющая в сигнале возбуждения не вносит никакого вклада в излучаемые поля и лишь ухудшает энергетические характеристики системы.

- Аналогично, среднее по времени значение напряжения на нагрузке приемной импульсной антенны во всех случаях равно 0.

- Как правило, временная протяженность излученного сверхкороткого электромагнитного импульса больше протяженности электрического сигнала, возбуждающего импульсную антенну.

- В свою очередь, временная протяженность электрического импульса на нагрузке приемной импульсной антенны больше протяженности электромагнитного импульса, возбуждающего эту антенну.

- Тем не менее, в принципе, может быть синтезирован такой электрический импульс возбуждения конкретной импульсной антенны, при котором в данном направлении получается желаемая эюра электромагнитного импульса, в том числе компактная во времени.

- Аналогично может быть синтезирована такая эюра электромагнитного импульса, падающего с определенного направления на конкретную импульсную антенну, обеспечивающую получение заданной формы напряжения на нагрузке приемной импульсной антенны.

2. Широкополосность импульсных и сверхширокополосных антенн

Фактически с самого начала радиотехники во всех линиях связи использовались модулированные синусоидальные электромагнитные волны. При этом занимаемые полосы частот Δf были много меньше несущей частоты f_0 . Стремление повысить качество и многообразие линий связи привело, как к необходимости увеличивать полосы частот, так, в свою очередь, к необходимости осваивать более высокочастотные диапазоны. Эти тенденции в полной мере нашли отражение в теории и практике антенн как устройств, осуществляющих преобразование электрических сигналов в электромагнитные и наоборот. Соответственно, развитие антенн шло от узкополосных (резонансных) до сверхширокополосных антенн. В настоящее время существуют сверхширокополосные антенны для работы со сравнительно узкополосными сигналами, в которых отношение максимальной рабочей частоты к минимальной достигает 50...100 в одной кон-

струкции [1,2].

Следует отметить, что широкополосность антенны не имеет четкого определения. Число параметров, достаточно полно характеризующих антенну, в режиме передачи и приема достигает 20 и все эти параметры изменяются при изменении частоты сигнала, возбуждающего антенну. На практике диапазонность антенны ограничивается недопустимым ухудшением для данной радиоэлектронной системы того или иного параметра антенны. При этом наиболее общим моментом является качество согласования антенны, как с аппаратурой, так и со свободным пространством. Очевидно, что этот момент важен и для импульсных антенн.

За последние полвека с лишним были выполнены фундаментальные теоретические работы, связанные с достижимым качеством согласования антенн и влияния на это качество желаемой полосы рабочих частот, размеров и общей геометрии антенны, а также энергетических потерь в конструкции антенны.

Плодотворным явилось использование теории сферических функций и разложения по сферическим функциям, а также понятия радиан-сферы для описания достижимых характеристик согласования электрически малых (размеры порядка длины волны и меньше) антенн. Отметим, что эта проблема особенно важна в современных условиях, когда непрерывно происходит фантастическое сокращение размеров элементной базы и электронных устройств в целом, а габариты антенн за этим процессом не успевают и, более того, как оказалось, подвержены физическим ограничениям принципиального характера.

Для практических оценок можно рекомендовать следующее соотношение, связывающее полосу рабочих частот, коэффициент полезного действия и минимально допустимые габариты антенны. Общей характеристикой габаритов антенны является минимальный радиус сферы “а”, в которую “вписывается” конструкция антенны [3]:

$$B \cdot \eta \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{k \cdot a} + \frac{1}{(k \cdot a)^3} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Простота формулы (1) не должна вводить в заблуждение, так как все величины, входящие в нее, требуют особого пояснения:

B – некоторая безразмерная величина, связанная с максимальной и минимальной частотами рабочего диапазона (f_{max} , f_{min}) формулой:

$$B = 2 \left(\frac{f_{max}}{f_{min}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{f_{max}}{f_{min}} + 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

η – коэффициент полезного действия, связанный с тепловыми потерями в конструкции антенны. Если конструкция выполнена полностью из металла, то $\eta=1$.

a – радиус сферы, в которую вписывается конструкция антенны. Для примера на рис.2 показана связь между радиусом сферы и схемой (конструкцией) антенны.

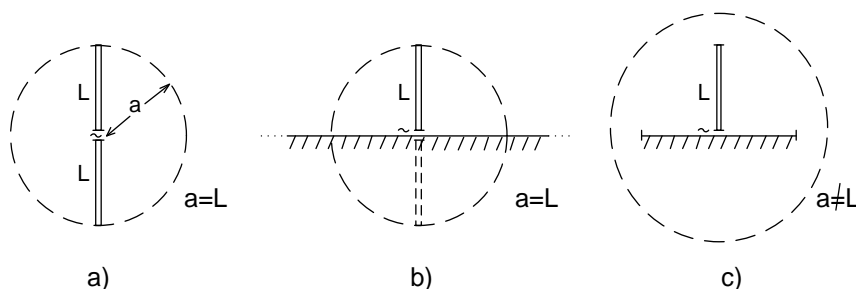


Рис. 1. Связь между конструкцией антенны и радиусом сферы [3].

На рис.1а показан уединенный симметричный вибратор, на рис.1б – несимметричный вибратор над бесконечной металлической плоскостью, на рис.1в – несимметричный вибратор над заземленной плоскостью конечных размеров. Возрастание радиуса

сферы в этом случае обусловлено резонансными, в общем, вредными свойствами металлической пластины конечных размеров.

Что касается параметра k , то $k=2\pi/\lambda$, но нет четких указаний на то, какую длину волны следует подставлять в формулу (1). Эту частоту можно понимать как резонансную длину волны “первородной” конструкции антенны, например, полуволнового вибратора. Тогда за искомую длину волны можно взять длину волны, соответствующую средней частоте желаемого диапазона частот. В этом случае $\lambda = \frac{2c}{\sqrt{f_{max} \cdot f_{min}}}$. Авторам настоящей работы из интуитивных соображений и опыта представляется более правильным за среднюю частоту принимать среднее геометрическое крайних частот диапазона, т.е. $\lambda = \frac{c}{\sqrt{f_{max} \cdot f_{min}}}$. Такая же рекомендация дается в недавно вышедшей монографии [4].

Следует подчеркнуть, что из формулы (1) следует, что при фиксированном “а” произведение достижимой полосы согласования на коэффициент полезного действия есть величина постоянная. Это обстоятельство впервые было отмечено в работе [5].

При решении проблем, связанных с согласованием антенн, полезно иметь в виду следующие общие положения [6]:

- в соответствии с формулой (1), любая, даже сколь угодно электрически малая антенна (т.е. с размерами $\ll \lambda$), может быть согласована в некоторой определенной полосе частот при сохранении высокого коэффициента полезного действия;
- с другой стороны, такая антенна может быть согласована в заданной широкой полосе частот ценой снижения ее коэффициента полезного действия;
- увеличение размера (габаритов) антенны следует рассматривать как ресурс, позволяющий повысить степень ее широкополосности или качество согласования в фиксированной полосе частот;
- при сохранении габаритов антенны увеличение размерности пространства, занимаемого конструкцией антенны, также должно рассматриваться как ресурс для повышения характеристик антенны. Так, переход от линейной конструкции к плоской антенной конструкции и, далее, к объемной, при условии, что конструкции вписываются в сферу того же диаметра, в потенциале существенно повышает импульсные и широкополосные характеристики антенны;
- в принципе, значительное увеличение полосы рабочих частот антенны требует относительно небольшого увеличения ее размеров. Отсюда следует, что если в радиоэлектронной системе используются несколько частотных полос при одинаковой поляризации излучения, целесообразна проработка возможности использования общей антенны. В этом случае функции частотного разделения сигналов должны возлагаться на такие элементы фидерного тракта, как коммутаторы и фильтры.

С точки зрения проблем, связанных с широкополосным согласованием, при выборе конкретной схемы и типа антенны можно руководствоваться следующим:

- в случае электрически малых антенн ($2\pi a/\lambda < 1$) предпочтительны объемные конструкции на базе проводов;
- для антенн, размеры которых $2\pi a/\lambda \sim 1$, возможны различные комбинации проводов и металлизированных поверхностей, например, площадок на печатных платах;
- в части потенциальной широкополосности сомнения вызывают диэлектрические резонаторные антенны, антенны, в которых используются магнитные материалы, фрактальные антенны, а также антенны, в которых используются метаматериалы.

3. Особенности проектирования импульсных антенн

В материалах раздела 2 отмечается существенное различие в свойствах и особенностях импульсных антенн и антенн традиционного типа, предназначенных для работы с

синусоидальными сигналами. В то же время объединяющим фактором является необходимость широкополосности прежде всего в отношении качества согласования антенны с остальной аппаратурой и свободным пространством. Основные положения в этой части изложены в разделе 2. Материалы настоящего раздела относятся не только к случаю проектирования электрически малых импульсных антенн, так как антенны часто входят в состав более сложных импульсных антенн, обеспечивающих большую направленность излучения и большее значение энергии сверхкороткого импульса в желаемой точке пространства.

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 [4], в которой попеременно, без четкого разделения, описываются вопросы, относящиеся как к сверхширокополосным, так и импульсным антеннам.

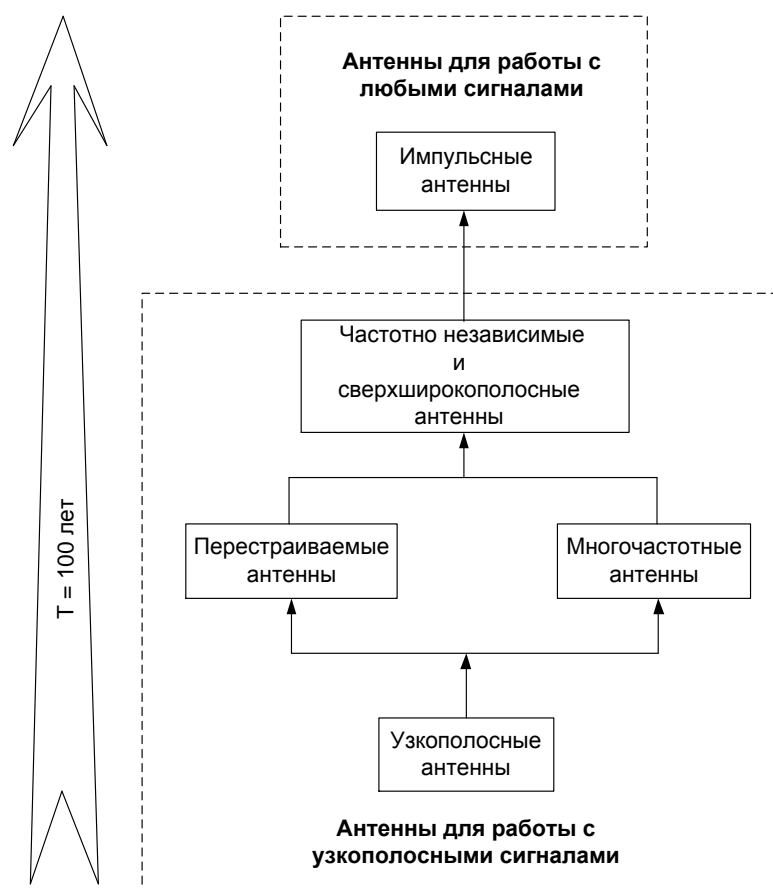


Рис. 2. Иерархия и эволюция антенных устройств.

На рис. 2 изображена иерархия антенных устройств. Одновременно рис. 2 можно рассматривать как отражение эволюции антенных устройств. Длина стрелки слева условно обозначает интервал времени в 100 лет. Очевидно, что импульсные антенны можно рассматривать как наиболее совершенные антенны, способные заменить все ти-

пы традиционных антенн. В этом смысле импульсные антенны можно назвать “благородными”.

В настоящее время отсутствуют устоявшиеся инженерные методы проектирования импульсных антенн. Однако эмпирический подход может с успехом дополняться результатами математического моделирования электродинамических процессов в импульсных антеннах. В качестве примера эффективности такого подхода можно рекомендовать работу [1].

Общие рекомендации по проектированию импульсных антенн можно свести к следующим:

1. С точки зрения обеспечения полосы частот, необходимой для излучения и приема импульсной антенной сверхкороткого электромагнитного импульса определенной длительности, за основу можно брать положения, изложенные в разделе 2.

2. Дополнительное расширение полосы частот может быть получено за счет применения в конструкции антенны различных поглотителей энергии (резисторов, проводников из материалов с плохой проводимостью, радиопоглощающих материалов). При этом, как указано в разделе 2, расширение полосы обратно пропорционально допускаемому снижению коэффициента полезного действия импульсной антенны. Таким образом, снижение КПД может рассматриваться в качестве ресурса, который может быть использован для улучшения импульсных характеристик антенны.

3. Увеличение размеров антенны (при фиксированной нижней частоте спектра) и степень приближения конфигурации импульсной антенны к сферической также являются факторами повышения качества импульсной антенны.

4. В конструкции импульсной антенны желательно избегать продольных (по отношению к направлению распространения импульса) элементов из плотного диэлектрика. Желательно также избегать и поперечных диэлектрических элементов толщиной более $\lambda_{\min}/(20\sqrt{\epsilon})$, что предотвратит появление переотражений в антенне и питающем тракте, приводящих к расплыванию импульсов во времени.

Литература

1. J.L. Volakis. IEEE Ant. and Prop. Mag. vol. 43, №6 pp.15-26, Dec 2001.
2. P. VanEtten, M.C. Wiiks. Bi-Blade Century Bandwidth Antenna. US Stationary Invention Registration, H1913 №7, 2010.
3. D.F. Sievenpiper, et al. IEEE Trans. on Ant. and Prop., vol. 6, №1, pp8-19, Jan 2012.
4. H. Schantz. Ultrawideland Antennas. Artech House, 2005.
5. Titov A.N., Titov A.A. Resistive Pulse Antennas. Second Int. Workshop Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2004, pp. 19-22, Sevastopol.
6. A.N. Titov. Radio Physics and Radio Astronomy, 2002, v.7, №4, pp. 479-482.