

АКТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ ПРИЕМА ИМПУЛЬСОВ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Е. В. Балзовский, Ю. И. Буянов, В. И. Кошелев
Институт сильноточной электроники СО РАН
bev@lhfe.hcei.tsc.ru

Представлены результаты исследований сверхширокополосной приемной двухполяризационной антенной решетки 4×4, предназначенной для исследования поляризационной структуры электромагнитных импульсов нано- и субнаносекундной длительности. Каждый элемент антенной решетки представляет собой два скрещенных диполя, плечи которых нагружены на усилители на полевых транзисторах. Представлены результаты исследований диаграмм направленности, действующей длины и формы регистрируемых импульсов. Исследованы шумовые характеристики и работоспособность антенны при воздействии мощных электромагнитных импульсов.

Введение

Использование сверхширокополосных (СШП) импульсов для зондирования объектов и сред позволяет не только обеспечивать высокое временное разрешение, но и распознавать зондируемые объекты по изменению временной формы отраженного электромагнитного поля. Значительная доля информации содержится в поляризационной структуре отраженных от объектов импульсов: при зондировании импульсным излучением с линейной поляризацией объекта, длина которого превышает пространственную протяженность СШП импульса, в отраженном сигнале присутствуют две ортогональные компоненты вектора напряженности электрического поля E . Форма кривой, описываемой концом вектора E в течение импульса, зависит от ориентации объекта относительно плоскости поляризации падающего поля [1]. Изменение поляризации отраженного излучения может служить дополнительным классификационным признаком при распознавании объектов. Для использования такой информации приемная антенна СШП радара должна обеспечивать одновременную регистрацию двух ортогональных компонент импульсного электромагнитного поля с минимальными искажениями. Этим условиям удовлетворяет приемная антенная решетка, состоящая из скрещенных диполей.

Применение диполей, каждое плечо которых нагружено непосредственно на вход электронной схемы с требуемой частотной зависимостью входного сопротивления и коэффициента передачи (активных диполей), позволяет существенно расширить полосу пропускания такой антенны в область низких частот и регистрировать СШП импульсы нано- и субнаносекундной длительности при искажениях временной формы не более 15% по среднеквадратическому критерию [2]. Определенную сложность представляет симметрирование диполей в широкой полосе частот. Одним из решений является использование симметричных линий в виде пары коаксиальных кабелей и выделение противофазной компоненты непосредственно перед несимметричным входом регистрирующего устройства. Такой подход не накладывает ограничений на размеры и конструкцию симметрирующего устройства и позволяет повысить помехозащищенность тракта за счет подавления наведенных сквозь оплетку кабеля синфазных токов. Для построения многоэлементной синфазной двухполяризационной решетки разработан антенный модуль 2×2 и двухканальное СШП симметрирующее устройство [3]. Определены оптимальные размеры скрещенных активных диполей и расстояние между элементами решетки для регистрации импульсов субнаносекундной длительности. Результаты исследования решетки 4×4, состоящей из четырех модулей, приведены ниже.

1. Конструкция антенной решетки

Внешний вид двухполяризационной антенной решетки 4×4 представлен на рис. 1. Решетка состоит из четырех идентичных антенных модулей 1, четырех блоков сумматоров первой

ступени суммирования 2, окончного блока сумматоров 3 и двухканального симметрирующего устройства 4. Антенный модуль содержит четыре скрещенных активных диполя, выполненных печатным способом на фольгированном стеклотекстолите. Каждое плечо диполя нагружено на вход однокаскадного усилителя на полевом транзисторе. Электрическая схема и топология печатных плат приведены в [3]. Фидерный тракт каждого антенного элемента (пары скрещенных диполей) состоит из четырех коаксиальных кабелей, образующих две экранированные симметричные линии. Эти линии закрыты объемным радиопоглощающим материалом. Расстояние между центрами элементов решетки равно 5.2 см. Напряжение питания антенной решетки 3 В, потребляемый ток составляет 1.6 А. Размеры и вес решетки равны, соответственно, 56×21×21 см и 2.6 кг.

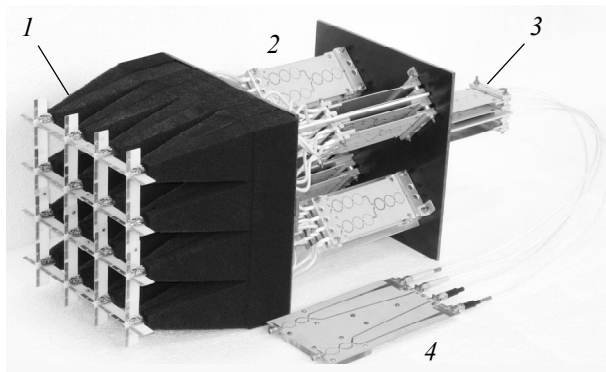


Рис. 1. Антенная решетка. 1 – антенные модули; 2 – суммирующие устройства (СУ) первой ступени; 3 – СУ второй ступени; 4 – симметрирующее устройство.

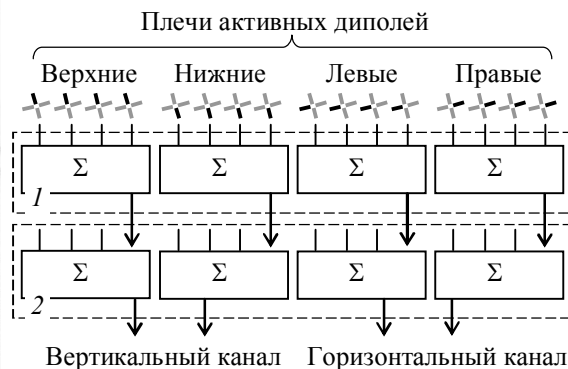


Рис. 2. Блок-схема антенны. 1 – СУ первой ступени; 2 – СУ второй ступени.

Блок-схема антенной решетки приведена на рис. 2. Сложение сигналов производится в несколько стадий. Условно разделим плечи всех диполей на верхние и нижние, левые и правые. В пределах одного антенного модуля синфазно складываются сигналы четырех верхних плеч в суммирующем устройстве (СУ) 1 на рис. 2. СУ (рис. 3) состоит из трех многозвенных кольцевых сумматоров, выполненных печатным способом на пластине фольгированного диэлектрика ФЛАН-5, элементы которых рассчитаны с соответствии с [4]. Волновые сопротивления полукольцевых линий имеют значения: $\rho_1^c = 57 \text{ Ом}$, $\rho_2^c = 71 \text{ Ом}$, $\rho_3^c = 87 \text{ Ом}$, длина линий соответствует четверти длины волны на частоте 2 ГГц. Волновое сопротивление соединительных линий $\rho_0 = 50 \text{ Ом}$. Номиналы резисторов r_1^c , r_2^c и r_3^c равны 390, 200 и 100 Ом соответственно. Полоса согласования СУ составляет 0.3...3.5 ГГц при КСВН ≤ 1.5 на любом из четырех входов. Коэффициент передачи с любого входа на выход составляет не менее -7 дБ в указанной полосе частот.

Аналогичные СУ использованы для суммирования сигналов четырех нижних плеч диполей антенного модуля, а также левых и правых. Четыре СУ конструктивно объединены в блок сумматоров первой ступени. На следующей стадии аналогичным образом суммируются сигналы с выходов четырех антенных модулей, соответствующих одноименным плечам диполей. Выходы СУ второй ступени подключены к двухканальному симметрирующему устройству [3], состоящему из СШП фазоинвертора и сумматора. Напряжения на выходах симметрирующего устройства соответствуют двум ортогональным компонентам вектора \mathbf{E} регистрируемых электромагнитных импульсов.

2. Характеристики антенной решетки во временной области

В качестве источника импульсов СШП излучения с линейной поляризацией использовалась комбинированная антенна [5], возбуждаемая генератором биполярных

импульсов длительностью 0.5 нс. В качестве эталонной антенны для сравнения формы регистрируемых импульсов использовалась ТЕМ-антенна размером 120×50×8 см и действующей длиной 4 см, определяемой как отношение напряжения на согласованном выходе к напряженности электрического поля в месте расположения антенны. Осциллограммы импульсов, зарегистрированных одним из каналов антенной решетки и ТЕМ-антенной при нормальном падении СШП импульсного поля приведены на рис. 4. (кривые 1 и 2 соответственно). Среднеквадратическое различие формы импульсов, принятых решеткой и ТЕМ-антенной, не превышает $\sigma = 0.2$. Действующая длина каждого канала решетки, рассчитанная из соотношения напряжений на выходе решетки и ТЕМ-антенны на одинаковом расстоянии до источника, равна 4.5 см. Поляризационная развязка между каналами не хуже 25 дБ.

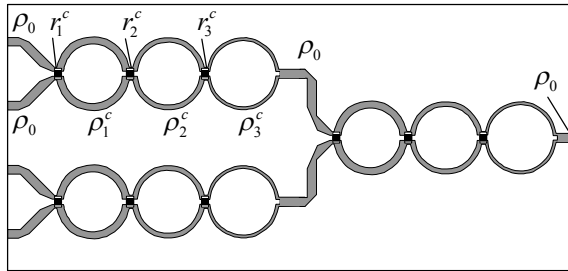


Рис. 3. Топология и расположение элементов на плате СУ.

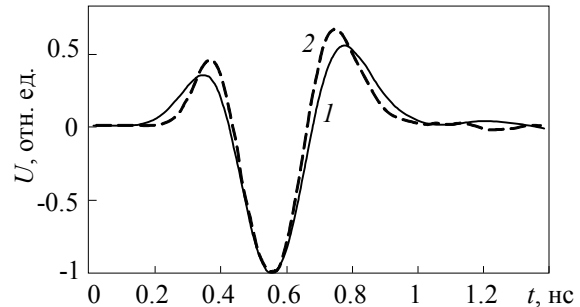


Рис. 4. Форма зарегистрированных импульсов: 1 – антенная решетка; 2 – ТЕМ-антенна.

Измеренные диаграммы направленности (ДН) решетки по пиковой мощности в H - и E -плоскостях приведены на рис. 5 (кривые 1 и 2 соответственно). На рис. 6 приведена зависимость среднеквадратического отклонения формы регистрируемых импульсов в различных направлениях от формы импульса в главном направлении. Эти искажения являются дополнительными, помимо отличия от формы импульсов, регистрируемых ТЕМ-антенной. Различие измеренной и расчетной кривых может быть вызвано влиянием объемного поглощающего материала, прикрывающего фидерные линии, не учитываемого в расчетах. Ширина ДН решетки по половинной мощности в обеих плоскостях составляет примерно 40° , в секторе углов $\pm 20^\circ$ дополнительные искажения формы импульса не превышают $\sigma = 0.2$.

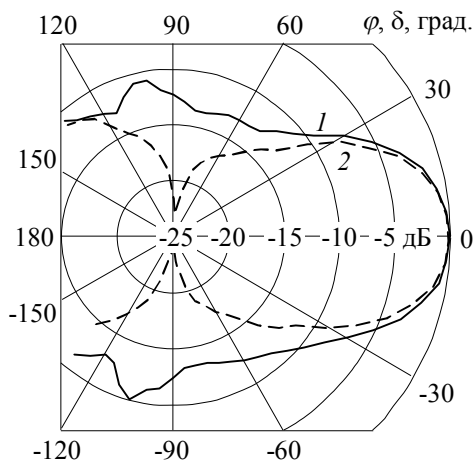


Рис. 5. ДН по пиковой мощности в H -плоскости (1) и E -плоскости (2).

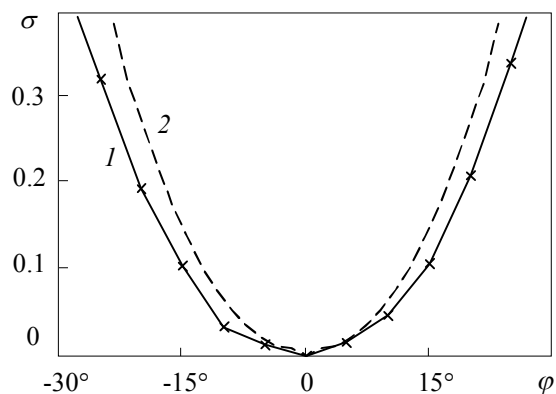


Рис. 6. Зависимость искажений формы регистрируемых импульсов от угла падения излучения: 1 – измерения; 2 – расчет.

3. Характеристики антенной решетки в частотной области

При определении характеристик антенной решетки в частотной области использовалась следующая методика. Для зарегистрированного исследуемой антенной импульса напряжения $U(t)$ рассчитывался спектр $F(f)$. Частотная зависимость действующей длины вычислялась по формуле: $l'_d(f) = l'_{d\text{ТЕМ}}(f) F(f) / F_{\text{ТЕМ}}(f)$, где $F_{\text{ТЕМ}}(f)$ – спектр импульса напряжения, зарегистрированного ТЕМ-антенной на том же расстоянии до передающей антенны, а $l'_{d\text{ТЕМ}}(f)$ – частотная зависимость действующей длины ТЕМ-антенны, приведенная в работе [6]. Для определения $l'_d(f)$ в диапазоне частот 0.2...6 ГГц, в качестве источников электромагнитного поля использовались низковольтные генераторы с тремя комбинированными антеннами (КА), оптимизированными для излучения импульсов разной длительности. На рис. 7 представлена частотная зависимость $|l'_d(f)|$ одного из каналов решетки, измеренная в диапазоне 0.2...2 ГГц с использованием КА [7] и генератора биполярных импульсов напряжением длительностью 1 нс (кривая 1), в диапазоне 1...4 ГГц с использованием КА [5] и генератора биполярных импульсов длительностью 0.5 нс (кривая 2), а в полосе частот свыше 2.5 ГГц – с использованием КА [6] и генератора биполярных импульсов длительностью 0.2 нс (кривая 3). Отклонение фазочастотной характеристики от линейной зависимости ($\Delta\Phi$) для антенной решетки приведено на рис. 8. Кривым 1–3 соответствуют измерения в тех же частотных диапазонах, что и на рис. 7. Благодаря линейности фазовой характеристики при достаточно сильной частотной зависимости $|l'_d(f)|$, антенная решетка позволяет регистрировать СШП электромагнитные импульсы с малыми искажениями.

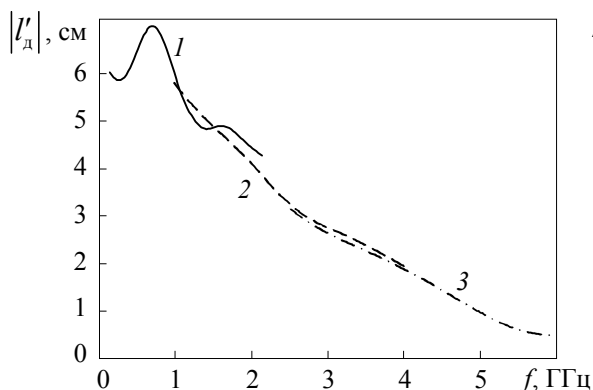


Рис. 7. Частотная зависимость действующей длины решетки.

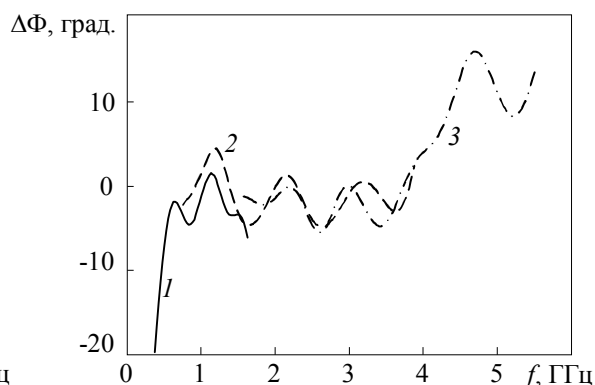


Рис. 8. Отклонение фазочастотной характеристики от линейной зависимости.

4. Динамический диапазон антенной решетки

Важной характеристикой активных антенн является динамический диапазон, под которым понимается отношение максимального уровня сигнала (A_m), при котором происходит его искажение, к чувствительности приемного тракта, определяемой уровнем собственных шумов. Обычно для гармонических сигналов под A_m понимается такой уровень, при котором происходит уменьшение амплитуды сигнала на 1 дБ вследствие насыщения активных элементов. При регистрации импульсов предлагается оценивать A_m по уровню искажения формы $\sigma = 0.1$ относительно формы импульса при малой напряженности поля.

По указанным выше критериям была проведена оценка динамического диапазона антенной решетки. Непосредственное подключение антенны к цифровому осциллографу *Tektronix TDS6604* в экранированной комнате показало, что шумы осциллографа значительно превышают шумы антенны. Напряжение, соответствующее шумовой дорожке осциллографа, равнялось 450 мкВ. Включение СШП линейного усилителя между выходом антенны и входом осциллографа увеличило шумовую дорожку до 3 мВ. При коэффициенте усиления линейного усилителя 36 дБ приведенный к выходу решетки уровень шума не превышал 50 мкВ.

Для измерения A_m использовался генератор монополярных импульсов длительностью 0.5 нс и выходным напряжением примерно 200 В и четырехэлементная (2×2) решетка передающих КА [8]. Напряженность поля в зависимости от расстояния была измерена с помощью ТЕМ-антенны и изменялась в пределах 30...250 В/м. В этих же условиях регистрировалась форма импульсов, принятых исследуемой антенной решеткой. Максимальная напряженность поля $|E|$, при которой амплитуда импульса уменьшалась на 1 дБ, составила 100 В/м, а по критерию искажения формы ($\sigma=0.1$) – 130 В/м. При $|E|=100$ В/м уровень сигнала A_m , отнесенный к выходу антенной решетки, составил 5.2 В для решетки 4×4, а при $|E|=130$ В/м – 5.8 В. Таким образом, динамический диапазон антенной решетки 4×4 составляет не менее 100 дБ.

Для исследования влияния мощных электромагнитных импульсов на работоспособность антенной решетки использовался высоковольтный генератор биполярных импульсов длительностью 1 нс и передающая КА. Воздействию подвергался активный диполь, аналогичный используемому в решетке. Испытания показали, что при воздействии импульсами с напряженностью поля до 6 кВ/м и частотой повторения 1 кГц форма регистрируемых импульсов существенно искажается вследствие насыщения активных элементов, однако при снятии воздействия работоспособность антенны восстанавливается с сохранением всех параметров.

Заключение

На основе предложенного подхода к построению синфазных антенных решеток с использованием скрещенных активных диполей, разработана и исследована 16-элементная двухполяризационная решетка с динамическим диапазоном не менее 100 дБ, предназначенная для регистрации компонент вектора напряженности электрического поля сверхширокополосных импульсов с произвольной поляризацией.

Показано, что разработанная антенная решетка позволяет с малыми искажениями регистрировать импульсы излучения длительностью 0.5...1.5 нс при напряженности поля до 100 В/м с поляризационной развязкой каналов не менее 25 дБ. Установлено, что в пределах ширины диаграммы направленности по половинной мощности искажения формы импульсов не превышают 20% по отношению к форме импульсов в главном направлении.

Работоспособность элементов антенной решетки восстанавливается после воздействия импульсов с напряженностью электрического поля до 6 кВ/м. При соответствующей системе защиты от попадания прямого излучения передающей антенны, антенная решетка может быть использована в сверхширокополосном радаре с большой пиковой мощностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // РЭ. 2005. Т.50. №8. С. 938.
2. Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. №5. С. 82.
3. Balzovsky E. V., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. // Proc. 15th Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2008. P. 418.
4. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. радио, 1972.
5. Efremov A.M., Koshelev V.I., Kovalchuk B.M. et al. // Proc. 14 Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2006. P. 446.
6. Andreev Yu. A., Efremov A. M., Koshelev V. I., et al. // Proc. 15th Inter. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2008. P. 447.
7. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др. // РЭ. 2007. Т. 52. №7. С. 813.
8. Кошелев В.И., Плиско В.В., Сухушин К.Н. // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: Докл. междунар. науч.-практ. конф. Томск. 2007. Ч. 1. С. 202.