УДК 621.396.67.095.13

А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов

Круговая поляризация антенн, излучающих сверхкороткие импульсы

Рассмотрен метод формирования круговой поляризации при излучении сверхкоротких импульсов при помощи преобразования Гильберта. Рассчитаны годографы полей в дальней зоне для некоторых реальных антенн.

Ключевые слова: сверхкороткие импульсы, сверхширокополосные антенны, преобразование Гильберта, круговая поляризация.

Как известно из рассмотрения узкополосных сигналов, для создания круговой поляризации необходимо наличие двух ортогональных в пространстве и времени сигналов. Пространственная ортогональность обеспечивается излучением сигнала двумя источниками с линейной поляризацией, расположенными под углом 90°. Свойство ортогональности во времени записывается в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} E(t)E_{\text{орт}}(t)dt = 0\,, \tag{1}$$

где $E_{\text{орт}}(t)$ – сигнал, ортогональный по времени сигналу $E(t)$. При этом предполагается, что $E_{\text{орт}}(t)$ не равен нулю.

Ортогональный сигнал рассчитывается при помощи преобразования Гильберта [1]:

$$E_{\text{орт}}(t) = \frac{1}{\pi} v.p. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E(\tau)}{t-\tau} d\tau\,, \tag{2}$$

где несобственный интеграл понимается в смысле главного значения по Коши.

В частотной области преобразование Гильберта действует как идеальный широкополосный фазовращатель, осуществляющий поворот фаз всех гармоник сигнала на 90°. При этом у сигнала устраняется постоянная составляющая, если она присутствует (рис. 1).

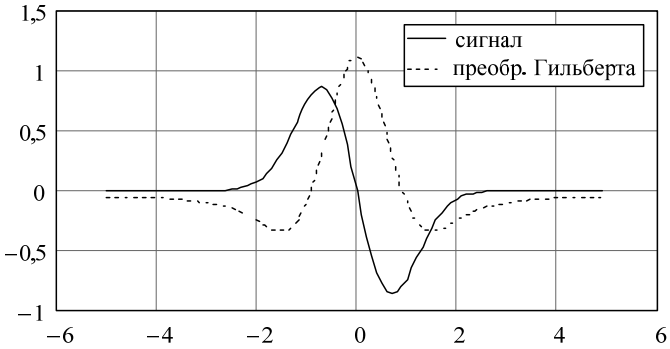

Рис. 1. Сигнал в виде производной гауссова импульса $E(t) = -2t\exp\left(-t^2\right)$ и его преобразование Гильберта

Для создания вращающейся поляризации необходима суперпозиция двух сигналов $E(t)$ и $E_{\text{орт}}(t)$, ортогональных в пространстве. В этом случае суммарный сигнал можно записать в следующем виде:

$$\vec{E}_{\Sigma}(t) = E(t)\vec{e}_y + E_{\text{орт}}(t)\vec{e}_x\,, \tag{3}$$

где $\vec{e}_y$ и $\vec{e}_x$ – орты системы координат.

Для сигналов $E(t)$ и $E_{\text{орт}}(t)$, показанных на рис. 1, годограф вектора поля в дальней зоне будет иметь вид, изображённый на рис. 2. Из рис. 2 видно, что конец вектора поляризации описывает в пространстве кардиоиду. Изменение амплитуды поляризационного вектора во времени (огибающей сигнала) показано на рис. 3.

Очевидно, что годограф поля будет иметь кардиоидную форму для любого финитного сигнала. В случае, рассмотренном выше, годограф поля имеет один виток. При сужении спектра сигнала и переносе его в более высокочастотную область в нём появятся дополнительные осцилляции, и годограф будет описывать дополнительные витки, близкие по форме к окружностям. В чистом виде круговая поляризация для финитных сигналов неосуществима, начало и конец годографа всегда будут иметь кардиоидную форму.

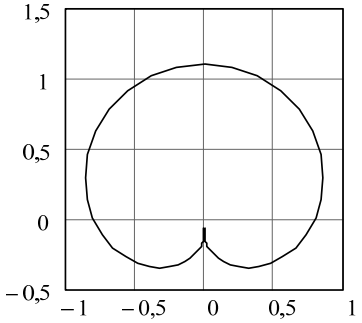

Рис. 2. Годограф суммарного поля в дальней зоне

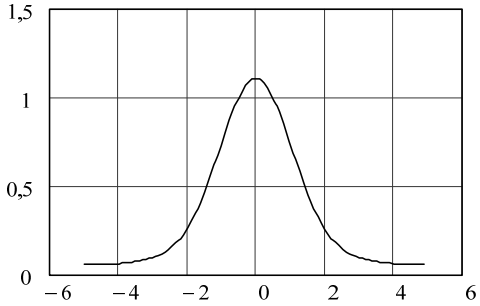

Рис. 3. Изменение амплитуды поляризационного вектора во времени

В соответствии с вышесказанным рассмотрим гауссов импульс с заполнением, который описывается выражением

$$E(t) = \exp\left(-t^2\right)\cos(\omega t). \tag{4}$$

Сигналы с различной частотой заполнения ω и их годографы приведены на рис. 4–7.

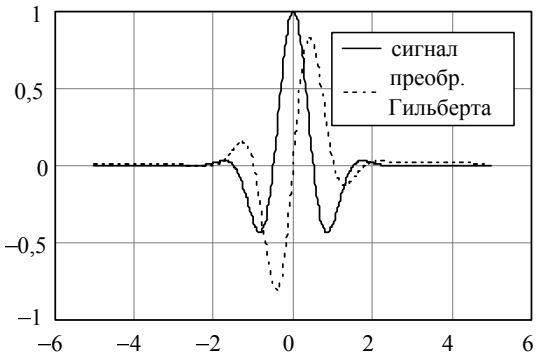

Рис. 4. Сигнал с частотой заполнения $\omega = \pi$ и его преобразование Гильберта

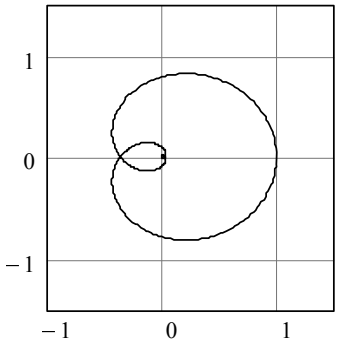

Рис. 5. Годограф поля для сигнала с частотой заполнения $\omega = \pi$

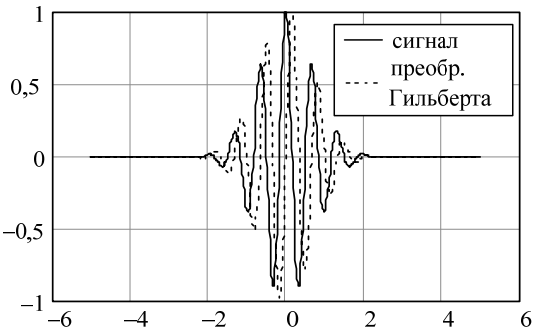

Рис. 6. Сигнал с частотой заполнения $\omega = 3\pi$ и его преобразование Гильберта

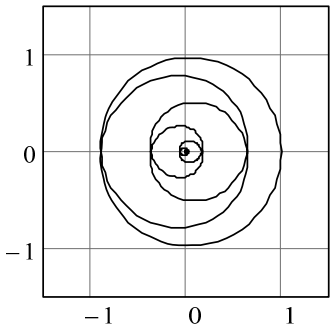

Рис. 7. Годограф поля для сигнала с частотой заполнения $\omega = 3\pi$

Задавая различные амплитудные соотношения, а также внося временной сдвиг между ортогональными сигналами, можно получить годографы, аналогичные эллиптической поляризации (рис. 8–9).

Рассмотрим некоторые типы реальных широкополосных антенн, способных излучать короткие импульсы: антенну Вивальди и логопериодическую вибраторную антенну (ЛПА).

Антенна Вивальди является одной из наиболее широко используемых антенн для излучения сверхширокополосных сигналов и сверхкоротких импульсов, совмещая в себе хорошие электрические, конструктивные и массогабаритные показатели. Импульс, излучённый такой антенной в пространство, практически не искажается [2].

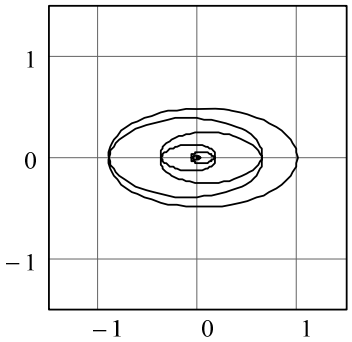

Рис. 8. Годограф поля для различных амплитудных соотношений ортогональных сигналов

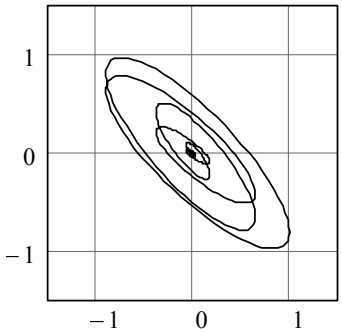

Рис. 9. Годограф поля при временном сдвиге между ортогональными сигналами

В ЛПА, в отличие от антенны Вивальди, присутствует дисперсия, вызванная перемещением фазового центра вдоль антенны с частотой, из-за чего высокочастотные гармоники сигнала излучаются антенной раньше низкочастотных и импульс рассыпается. Теоретически, однако, существует возможность компенсировать дисперсию и связанную с ней неравномерность ГВЗ в тракте обработки принятого сигнала. Преимущество же ЛПА связано с простотой её расчёта и конструирования и возможностью использования в качестве облучателя зеркальной антенны [3].

На рис. 10–14 приведены графики сигналов, излучённых каждой из ортогонально расположенных антенн по отдельности и годографы суммарного поля в дальней зоне. Расчёт сигналов проведён численно в CST Studio Suite, на антенны подавался сигнал, приведённый на рис. 1, точка наблюдения находится на оси антенны.

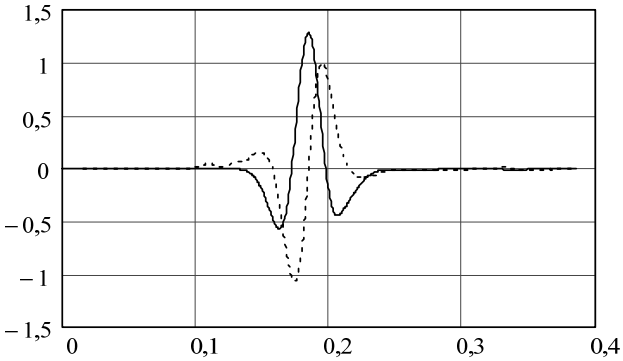

Рис. 10. Сигналы, излучённые ортогональными антеннами Вивальди в пространство

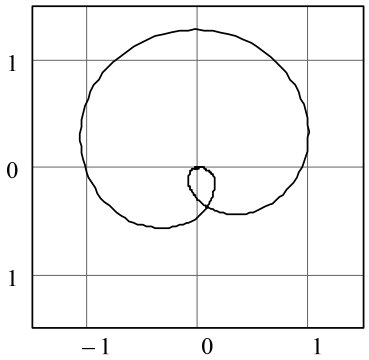

Рис. 11. Годограф поля, излученного ортогональными антеннами Вивальди

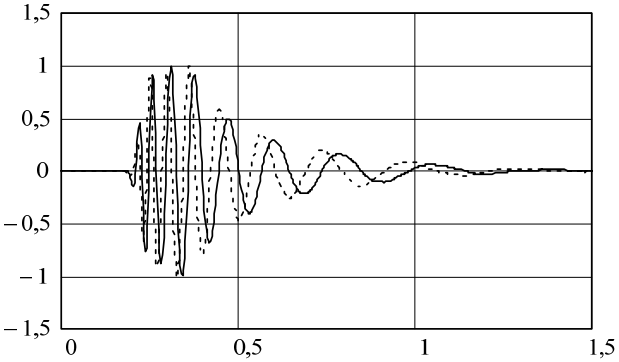

Рис. 12. Сигналы, излучённые ортогональными ЛПА в пространство

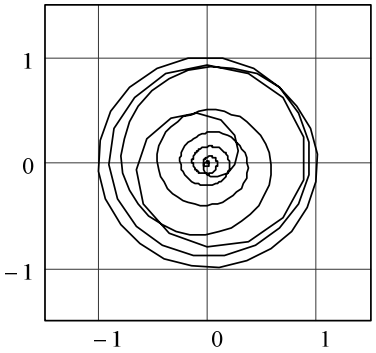

Рис. 13. Годограф поля, излученного ортогональными ЛПА

При приёме сигнала с круговой поляризацией на антенну с линейной поляризацией форма сигнала будет зависеть от угла расположения приёмной антенны. Временная зависимость наблюдаемого сигнала в дальней зоне для угла наблюдения φ определяется выражением

$$E_{\varphi}(t) = E(t)\cos\varphi + E_{\text{орт}}(t)\sin\varphi\,, \tag{5}$$

где φ – угол между плоскостью антенны, излучающей исходный сигнал, и плоскостью приёмной антенны.

В выражении (5) $E_{\text{орт}}(t)$ означает ортогональность в пространстве, однако в силу линейности антенн и преобразования Гильберта излучённые ортогональными антеннами сигналы сохраняют ортогональность и во времени. В соответствии с этим можно переписать формулу (5) для аналитического сигнала $E_a(t) = E(t) + jE_{\text{орт}}(t)$:

$$E_{\varphi}(t) = \mathrm{Re}\left(E_a e^{-j\varphi}\right). \tag{6}$$

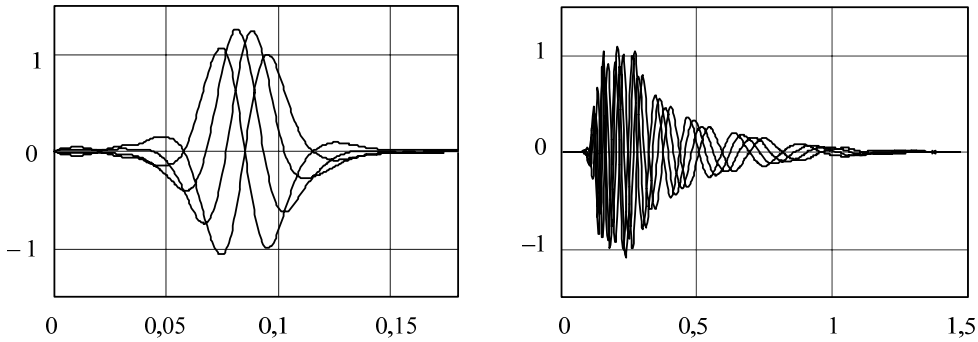

Рис. 14. Сигналы, излучённые в пространство системой из двух ортогональных антенн, наблюдаемые под различными углами.

Из рис. 10–14 видно, что если две реальные антенны линейной поляризации, расположенные под прямым углом, возбуждать ортогональными сигналами, рассчитанными при помощи преобразования Гильберта, то вектор поляризации результирующего сигнала в пространстве будет описывать кривые кардиоидной формы. При наличии в излучённом сигнале высокочастотного заполнения, как в случае ЛПА, поляризационный вектор совершает несколько оборотов по кривой, близкой к окружности.

Литература

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

2. Gibson P.J. The vivaldi aerial. – Proc. 9th Eur. microwave conf., Brighton, UK, Sept 1979. – Brighton, 1979. – P. 101–105.

3. DuHamel R.H. Log periodic feeds for lens and reflectors / R.H. DuHamel, F.R. Ore // 1959 IRE National Convention Record. – March 1959. – P. 128–137.

Александрин Антон Михайлович
Аспирант каф. радиотехники ИИФиРЭ СФУ
Тел.: 8-965-897-67-92
Эл. почта: aalexandrin@sfu-kras.ru

Саломатов Юрий Петрович
Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. радиотехники
Института инженерной физики и радиоэлектроники (ИИФиРЭ) СФУ
Эл. почта: ysalomatov@sfu-kras.ru

Alexandrin A.M., Salomatov Y.P.
Circular polarization of short-pulse antennas

The article describes the method of forming the short pulse circular polarization via Hilbert transform. Far-field hodographs were calculated for some real antennas.
Keywords: short pulses, ultra wideband antennas, Hilbert transform, circular polarization.