

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ТРИПЛЕТА

Введение

Поляризационная структура сигналов стала активно использоваться во многих областях: в телевидении, технической диагностике, медицине, а также при обеспечении информационной безопасности. Ярким примером радиоэлектронных информационных систем, которые используют различные виды поляризации, являются мониторинговые системы, которые обладают более высокой стоимостью в связи с тем, что для них требуется многоканальное наблюдение из-за необходимости получить оценку векторности принятых сигналов [1]. Поэтому актуально разрабатывать новые способы и устройства, которые позволяют формировать сложную поляризационную структуру зондирующих сигналов. К классу таких способов относится способ формирования СВЧ-сигнала с ортогонально поляризованными боковыми зеркальными составляющими [2].

Постановка и решение задачи

Всякое устройство, реализующее способ, всегда представляется в обобщенном виде, поэтому при попытках практически осуществить его возникают затруднения. Представляемый в данной статье способ не является исключением. В связи с этим ставится задача детально проанализировать процесс формирования ортогональной поляризации боковых зеркальных составляющих микроволнового сигнала, выявить условия, обеспечивающие различные виды их поляризации, а также проанализировать, как управлять всеми параметрами поляризации.

Рассмотрим упрощенный вариант реализации способа – когда сигнал состоит из одного триплета, т.е. из несущей и двух боковых зеркальных составляющих сигнала, схема формирования которого представлена на рис. 1, где ω_0, Ω_1 – генераторы несущих и модулирующих колебаний, $U_{10x,y}, A_{1x,y}$ – аттенюаторы несущих и модулирующих колебаний x, y -каналов; $\Phi_{10x,y}, \Phi_{1x,y}$ – фазовращатели несущих и модулирующих колебаний x, y -каналов; $M_{1x,y}$ – модуляторы x, y -каналов; Σ_{\perp} – ортогональный сумматор.

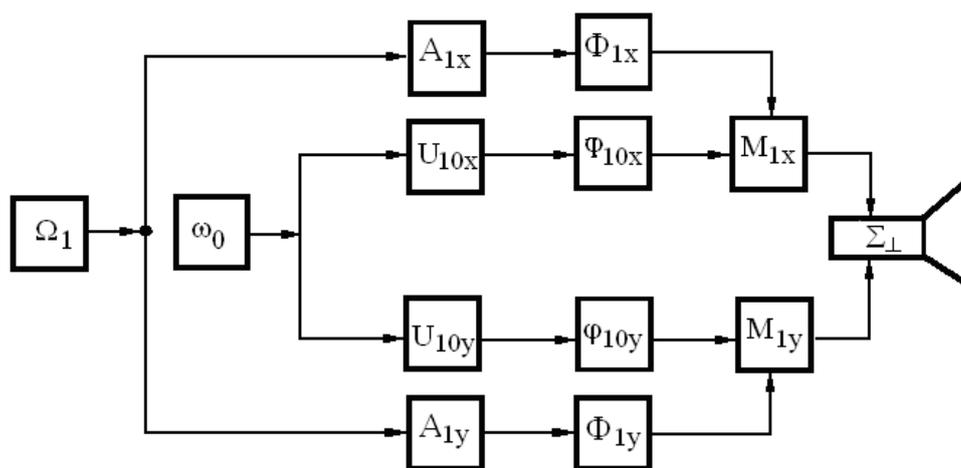


Рис. 1

Как известно, векторные составляющие сигнала (в данном случае рассматриваются левые) в x, y -каналах имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1x} &= \bar{x}^0 \left\{ U_{11x} \cos \left[(\omega_0 - \Omega_1)t + (\varphi_{10x} - \Phi_{1x}) \right] \right\}, \\ \bar{U}_{1y} &= \bar{y}^0 \left\{ U_{11y} \cos \left[(\omega_0 - \Omega_1)t + (\varphi_{10y} - \Phi_{1y}) \right] \right\}.\end{aligned}\quad (1)$$

Комплексно-векторная запись вида этих составляющих выглядит так:

$$\dot{U}_{1x} = \dot{U}_{11x} \cos(\omega_0 - \Omega_1)t = U_{11x} e^{j(\varphi_{10x} - \Phi_{1x})} \cos(\omega_0 - \Omega_1)t. \quad (2)$$

$$\dot{U}_{1y} = \dot{U}_{11y} \cos(\omega_0 - \Omega_1)t = U_{11y} e^{j(\varphi_{10y} - \Phi_{1y})} \cos(\omega_0 - \Omega_1)t \quad (3)$$

Это позволяет выразить поляризацию каждой составляющей комплексным параметром – фазором по линейно поляризованному базису:

$$\dot{p}_{11} = j \frac{\dot{U}_{11y}}{\dot{U}_{11x}} = V_1 e^{j\left(\Delta\varphi_{10} + \frac{\pi}{2} - \Delta\Phi_1\right)}, \quad (4)$$

$$\dot{p}_{13} = j \frac{\dot{U}_{13y}}{\dot{U}_{13x}} = V_1 e^{j\left(\Delta\varphi_{10} + \frac{\pi}{2} + \Delta\Phi_1\right)}, \quad (5)$$

где $\dot{p}_{11,13}$ – фазоры левой и правой зеркальных составляющих соответственно; $\Delta\varphi_{10}$ – разность фаз между несущими колебаниями в x -, y - каналах; $\Delta\Phi_1$ – разность фаз между модулирующими колебаниями в базисных каналах.

Условием поляризационной ортогональности зеркальных составляющих микроволнового сигнала является соотношение фазоров [3]:

$$\dot{p}_{13} \cdot \dot{p}_{11}^* = -1, \quad (6)$$

где \dot{p}_{11}^* – фазор левой зеркальной составляющей, сопряженный с фазором \dot{p}_{11} :

$$\dot{p}_{11}^* = V_1 \cdot e^{-j\left(\Delta\varphi_{10} + \frac{\pi}{2} - \Delta\Phi_1\right)}. \quad (7)$$

Фазор \dot{p}_{13} связан с комплексным фазором по кругополяризованному базису \dot{q}_{13} соотношением

$$\dot{p}_{13} = \frac{1 - \dot{q}_{13}}{1 + \dot{q}_{13}}, \quad (8)$$

а фазор \dot{q}_{13} связан с геометрическими параметрами поляризационного эллипса:

$$\dot{q}_{13} = \frac{1 - \eta_{13}}{1 + \eta_{13}} e^{-j2\beta_{13}}, \quad (9)$$

где η_{13}, β_{13} – коэффициент эллиптичности и угол ориентации поляризационного эллипса правой составляющей.

Используя (8) и (9), выразим фазор \dot{p}_{13} через геометрические параметры η_{13}, β_{13} :

$$\dot{p}_{13}^* = \frac{\left(1 + \eta_{13} - e^{-j2\beta_{13}} + \eta_{13} e^{-j2\beta_{13}}\right)}{\left(1 + \eta_{13} + e^{-j2\beta_{13}} - \eta_{13} e^{-j2\beta_{13}}\right)}. \quad (10)$$

Аналогично определим фазор \dot{p}_{11}^* :

$$\dot{p}_{11}^* = \frac{\left(1 + \eta_{11} - e^{j2\beta_{11}} + \eta_{11} e^{j2\beta_{11}}\right)}{\left(1 + \eta_{11} + e^{j2\beta_{11}} - \eta_{11} e^{j2\beta_{11}}\right)}. \quad (11)$$

Подставив (10) и (11) в (6), получим уравнение с четырьмя независимыми переменными. Чтобы уменьшить их количество, необходимо как-то увязать одноименные переменные. Увязывают их следующим образом. Пусть

$$\begin{cases} r_{13} = -r_{11}, \\ \beta_{13} = \beta_{11} + \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

Подставив (12) в (10), а затем (10) и (11) в (6), получим уравнение с двумя независимыми переменными r_{11} и β_{11} :

$$\frac{\left(1 - r_{11} + e^{-j2\beta_{11}} + r_{11} \cdot e^{-j2\beta_{11}}\right) \left(1 + r_{11} - e^{j2\beta_{11}} + r_{11} \cdot e^{j2\beta_{11}}\right)}{\left(1 - r_{11} - e^{-j2\beta_{11}} - r_{11} \cdot e^{-j2\beta_{11}}\right) \left(1 + r_{11} + e^{j2\beta_{11}} - r_{11} \cdot e^{j2\beta_{11}}\right)} = -1. \quad (13)$$

После преобразований будем иметь

$$\frac{\left[e^{-j2\beta_{11}} (1 + r_{11})^2 - e^{j2\beta_{11}} (1 + r_{11}^2) \right]}{-\left[e^{-j2\beta_{11}} (1 + r_{11})^2 - e^{j2\beta_{11}} (1 + r_{11}^2) \right]} \equiv -1. \quad (14)$$

Таким образом, если обеспечена ортогональность поляризаций боковых зеркальных составляющих, то геометрические параметры их поляризационных эллипсов действительно находятся в соотношении (12). Причем условие ортогональности не нарушается при любых значениях r_{11} и β_{11} . Но пока нам неизвестно, как их найти и обеспечить практически, а затем по ним узнать параметры правой спектральной составляющей r_{13} и β_{13} из соотношений (12).

Подставим выражения для фазоров \dot{r}_{13} и \dot{r}_{11}^* (5) и (7) в (6):

$$V_1 e^{j\left(\pm\Delta\Phi_{10} + \frac{\pi}{2}\right)} e^{j\Delta\Phi_1} V_1 e^{-j\left(\pm\Delta\Phi_{10} + \frac{\pi}{2}\right)} e^{j\Delta\Phi_1} = e^{\pm j\pi}. \quad (15)$$

Из соотношения (15) находим, что

$$A_{1y} = A_{1x}, \quad \Delta\Phi_1 = \pm \frac{\pi}{2}. \quad (16)$$

Из (15) видно также, что изменение знака у $\Delta\Phi_{10}$ не влияет на условия (16). Таким образом, мы конкретизировали необходимые условия поляризационной ортогональности (6), которые мы уже можем обеспечить практически. Но эти условия не являются достаточными, так как не ясно, как нам поступать с r_{11} и β_{11} .

Используя связь фазоров (8), найдем фазор \dot{q}_{11}^* .

$$\dot{q}_{11}^* = \frac{1 - \dot{r}_{11}^*}{1 + \dot{r}_{11}^*}. \quad (17)$$

Из выражения (7) определим фазор \dot{r}_{11}^* при четырех вариантах знаков у $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_{10}$, а затем подставляя его значение в (17), найдем фазоры \dot{q}_{11}^* , сравнивая амплитуды и фазы которых с известным выражением

$$\dot{q}_{11}^* = \frac{1 - r_{11}}{1 + r_{11}} e^{j2\beta_{11}}, \quad (18)$$

определим $\Delta\Phi_{10}$ и β_{11} . Для наглядности сведем результаты в таблицу:

I	$\Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}$	$\Delta\varphi_{10} > 0$	$\Delta\varphi_{10} = \frac{\pi}{2} - 2\arctg r_{11}$	$\beta_{11} = \frac{\pi}{4}$	$\dot{p}_{11}^* = e^{-j\Delta\varphi_{10}}$
II	$\Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}$	$\Delta\varphi_{10} < 0$	$\Delta\varphi_{10} = \frac{\pi}{2} - 2\arctg r_{11}$	$\beta_{11} = -\frac{\pi}{4}$	$\dot{p}_{11}^* = e^{j\Delta\varphi_{10}}$
III	$\Delta\Phi_1 = -\frac{\pi}{2}$	$\Delta\varphi_{10} > 0$	$\Delta\varphi_{10} = \frac{\pi}{2} + 2\arctg r_{11}$	$\beta_{11} = -\frac{\pi}{4}$	$\dot{p}_{11}^* = -e^{-j\Delta\varphi_{10}}$
IV	$\Delta\Phi_1 = -\frac{\pi}{2}$	$\Delta\varphi_{10} < 0$	$\Delta\varphi_{10} = \frac{\pi}{2} + 2\arctg r_{11}$	$\beta_{11} = \frac{\pi}{4}$	$\dot{p}_{11}^* = -e^{j\Delta\varphi_{10}}$

Рассмотрим различные варианты поляризаций левой зеркальной составляющей.

1. Линейная поляризация.

Пусть $A_{1x} = A_{1y}$, $\Delta\Phi_1 = \pm \frac{\pi}{2}$, $\beta_{11} = \frac{\pi}{4}$, $r_{11} = 0$, тогда $\Delta\varphi_{10} = \frac{\pi}{2}$.

2. Эллиптическая поляризация.

Пусть $A_{1x} = A_{1y}$, $\Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}$, тогда при $r > 0$, $0 < \Delta\varphi_{10} < \frac{\pi}{2}$, а при $r < 0$, $\frac{\pi}{2} < \Delta\varphi_{10} < \pi$.

Если $\Delta\Phi_1 = -\frac{\pi}{2}$, то при $r > 0$, $\frac{\pi}{2} < \Delta\varphi_{10} < \pi$, а при $r < 0$, $0 < \Delta\varphi_{10} < \frac{\pi}{2}$.

Построим график зависимости $\Delta\varphi_{10} = f(r_{11})$:

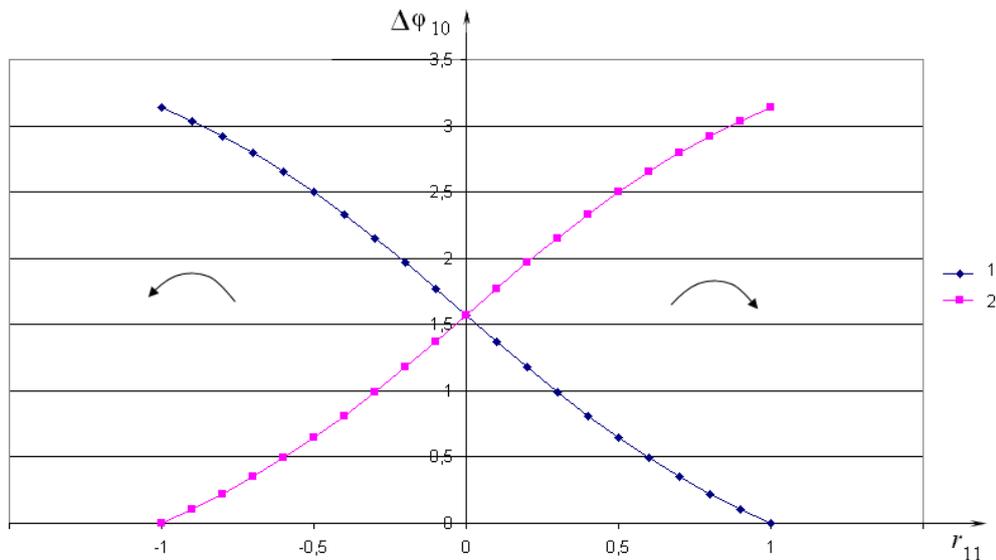


Рис. 2

3. Круговая поляризация.

Пусть $\Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}$, $r_{11} = 1$, тогда $\Delta\varphi_{10} = 0$. Если $\Delta\Phi_1 = -\frac{\pi}{2}$, а $r_{11} = 1$, то $\Delta\varphi_{10} = \pi$.

При $\Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}$ и $r_{11} = -1$, $\Delta\varphi_{10} = \pi$, а при $\Delta\Phi_1 = -\frac{\pi}{2}$ и $r_{11} = -1$, $\Delta\varphi_{10} = 0$.

Таким образом, левое направление вращения вектора электрического поля \vec{E} для вращающихся поляризаций можно реализовать двумя способами:

$$1) \Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}, \Delta\varphi_{10} = \pi. \quad 2) \Delta\Phi_1 = -\frac{\pi}{2}, \Delta\varphi_{10} = 0.$$

Правое направление вращения также возможно реализовать двумя способами:

$$1) \Delta\Phi_1 = \frac{\pi}{2}, \Delta\Phi_{10} = 0.$$

$$2) \Delta\Phi_1 = -\frac{\pi}{2}, \Delta\Phi_{10} = \pi.$$

Построим график зависимости $\beta_{11} = f(\Delta\Phi_{10}, \Delta\Phi_1)$:

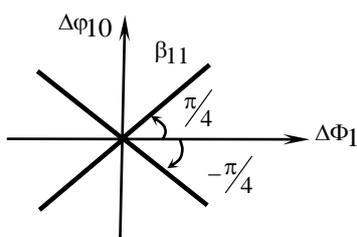


Рис. 3

Выводы

Таким образом, мы конкретизировали необходимые и достаточные условия поляризационной ортогональности применительно к данной схеме формирования сигнала, воздействуя на параметры которой, можем реализовать любой вид поляризации как линейной, так и вращающейся, как правого, так и левого направления вращения, формируя зондирующий сигнал, параметры поляризации которого будут известны априорно на передающей стороне, а по изменению этих параметров после отражения от объектов наблюдения можно будет судить о свойствах объекта, что может найти применение в радиолокации, технической диагностике, неразрушающем контроле и в других случаях.

Список литературы: 1. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. – М. : Радиотехника, 2005. – 704с. 2. А.с.СССР, Кл.⁴ Н01q15/24. Способ формирования СВЧ-сигнала с поляризованными спектральными составляющими / Горобец Н.Н., Давидчевский Ю.И., Чеботарев В.И., Чекалин Г.М. (СССР). – №1394292 ; приоритет от 05.04.86 ; опубл.07.05.88, Бюл.№17.С.212. 3. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М. : Сов. радио, 1966. – 440с.

Харьковский национальный
университет им. В.Н. Каразина

Поступила в редколлегию 25.09.2014