

УДК 621.396.67

УПРАВЛЯЕМАЯ АНТЕННА КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ. I. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Л. Л. Базелян

Рассмотрены некоторые варианты схем компенсации, обеспечивающие одновременное излучение (прием) в произвольном направлении электромагнитного поля двух круговых поляризаций противоположного знака с помощью неподвижных двух взаимно перпендикулярных диполей, расположенных в свободном пространстве и над землей.

В некоторых приложениях возникает необходимость приема (излучения) поляризованных по кругу электромагнитных волн. Прием может быть осуществлен с помощью двух взаимно перпендикулярных диполей в совокупности со схемой компенсации. Ниже рассматривается такая возможность.

Два взаимно перпендикулярных диполя Герца в свободном пространстве. Компоненты поля (см., например, [1]) в прямоугольной системе координат имеют вид

$$E_j = -i\omega A_j - i \frac{1}{\epsilon_0 \omega} \text{grad div } A,$$

где обозначения общепринятые, а векторный потенциал связан с током диполя следующим соотношением:

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I \exp [i(\omega t - kr)]}{r}.$$

Если токи двух расположенных на плоскости xOy взаимно перпендикулярных диполей Герца связаны выражением

$$I_y = m I_x e^{-i\alpha},$$

то, переходя к сферическим координатам (r, φ, Δ) и опуская временной множитель, можно представить нормированные на 1 компоненты результирующего поля в виде (см. рис. 1)

$$E_\varphi = \sin \varphi - m e^{-i\alpha} \cos \varphi, \quad E_\Delta = -\cos \varphi \sin \Delta - m e^{-i\alpha} \sin \varphi \sin \Delta. \quad (1)$$

Такие два диполя излучают в произвольном направлении эллиптически поляризованную волну. Ее можно разложить на две круговые: право- и левополяризованную (соответственно E_1 и E_2),

$$E_1 = E_\varphi - i E_\Delta, \quad E_2 = E_\varphi + i E_\Delta. \quad (2)$$

Из (1) и (2) видно, что если два взаимно перпендикулярных диполя имеют равные по амплитуде ($m=1$) и сдвинутые по фазе на $\alpha=\pi/2$ ($\alpha=-\pi/2$) токи, то они излучают волну с чисто круговым правополяризованным (левополяризованным) полем только в направлении $\Delta=90^\circ$.

Параметры m и α , при которых обеспечивается излучение кругового поля правого (левого) вращения в произвольном направлении, найдем из условия $|E_2|=0$ ($|E_1|=0$). Получим

$$m_{1,2} = \frac{|I_y|}{|I_x|} = \frac{E_x}{E_y}, \quad (3)$$

$$\sin \alpha_{1,2} = \pm \frac{\sin \Delta}{E_x E_y}, \quad \cos \alpha_{1,2} = \frac{\sin 2\varphi \cos^2 \Delta}{2E_x E_y},$$

где $E_x = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \Delta}$ и $E_y = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \Delta}$ — поля диполей «X» и «Y». Здесь и ниже первый индекс соответствует верхнему знаку, а второй — нижнему. При этом модуль и фаза волны

$$|E_{1,2}| = 2 \sin \Delta / E_y, \quad (4)$$

$$\sin \psi_{1,2} = \pm \cos \varphi / E_y, \quad \cos \psi_{1,2} = \sin \varphi \sin \Delta / E_y.$$

Физический смысл (3) очевиден. Чтобы, например, $|E_2| = 0$, необходимо выбрать токи в диполях таким образом, чтобы выровнять амплитуды их полей и, кроме того, ток в диполе «Y» задержать по фазе на α_1 . Из простых геометрических соображений следует, что α_1 дополняет видимый в направлении излучения угол между диполями до π .

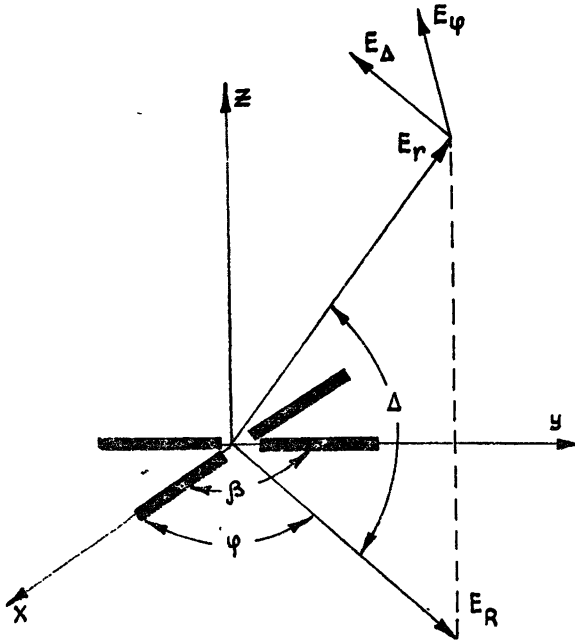


Рис. 1

На рис. 2 приведена схема, обеспечивающая прием двух противоположно поляризованных по кругу волн. Включение в каждый диполь управляемого аттенюатора связано с необходимостью уменьшения тока, как в диполе «X» (при $\varphi > 45^\circ$), так и в «Y» (при $\varphi < 45^\circ$). Необходимость в них отпадает при любых углах места Δ , только если $\varphi = 45^\circ$ (см. рис. 1). Из (3) следует, что при указанном на рис. 2 включении законы управления фазовращателями и аттенюаторами в обоих каналах оказываются одними и теми же.

Насколько нам известно, впервые идея компенсации с помощью фазового сдвига пространственной неортогональности полей, излучаемых турникетным антенным элементом в произвольном направлении, была описана в [2, 3], но только исходя из рассмотрения не круговых, а линейно поляризованных волн. Однако та же цель может быть достигнута другим способом.

Пусть в схеме рис. 3 запитан, например, «правый» канал. Тогда если отключить состоящие из управляемых аттенюатора и фазовращателя цепоч-

ки А, В и показанный пунктиром УФ, то при произвольной фазе фазовращателя Φ будет излучаться правополяризованная эллиптическая волна. Ее можно разложить на две круговые: правую ($E_1^{(1)}$) и левую ($E_2^{(1)}$). (Относящиеся к «правому» каналу параметры, например поле, будем обозначать $E^{(1)}$, а для «левого» — $E^{(2)}$.) Для того чтобы излучалась только волна, поляризованная по правому кругу, необходимо подключить цепочку А и подобрать УА ослабление k и УФ фазу тока χ такими, при которых «левым» каналом будет излучаться волна $|E_2^{(2)}| = |E_2^{(1)}|$, по противоположной фазе. Аналогично нужно поступить и с «левым» каналом.

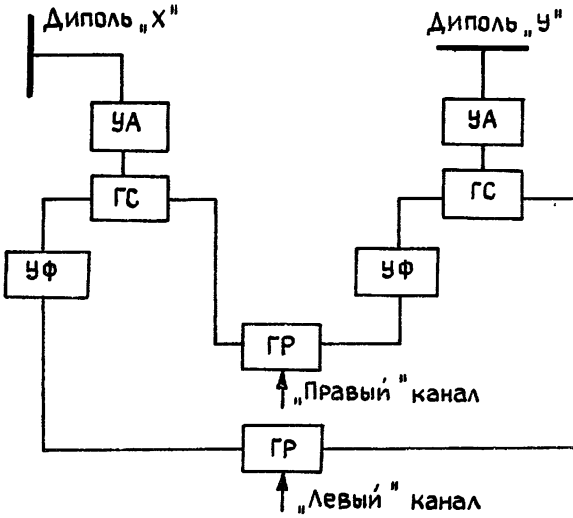


Рис. 2. УА — управляемый аттенюатор, УФ — управляемый фазовращатель, ГР — гибридный разветвитель, ГС — гибридный сумматор.

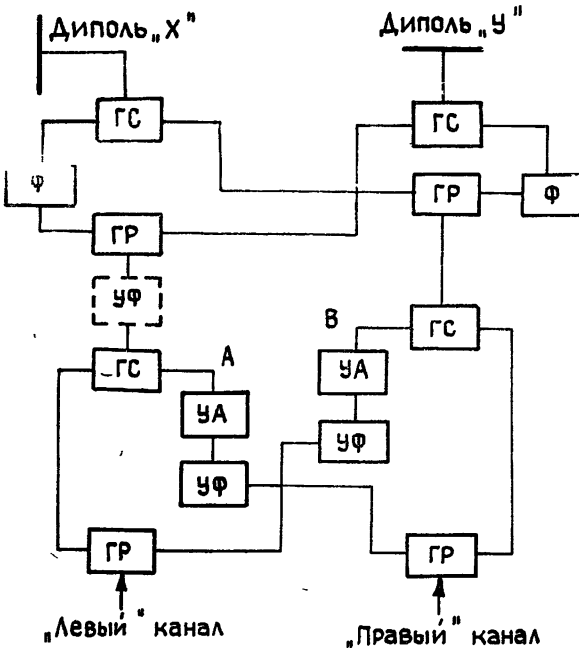


Рис. 3. УА — управляемый аттенюатор, УФ — управляемый фазовращатель, Ф — неуправляемый фазовращатель, ГР — гибридный разветвитель, ГС — гибридный сумматор.

Вычислим необходимые для этого k и χ . Имея в виду, что $m=1$, выпишем согласно (1) и (2) модули полей и их фазы для «правого» и «левого» каналов:

$$|E_{1,2}^{(1)}| = |E_{2,1}^{(2)}| = [2(1 \pm \sin \alpha \sin \Delta) - (1 + \cos \alpha \sin 2\varphi) \cos^2 \Delta]^{1/2},$$

$$\sin \psi_{1,2}^{(1)} = -\sin \psi_{2,1}^{(2)} = \frac{\pm \cos \varphi \sin \Delta + \sin \alpha \cos \varphi \pm \cos \alpha \sin \varphi \sin \Delta}{|E_{1,2}^{(1)}|},$$

$$\cos \psi_{1,2}^{(1)} = \cos \psi_{2,1}^{(2)} = \frac{\sin \varphi - \cos \alpha \cos \varphi \pm \sin \alpha \sin \varphi \sin \Delta}{|E_{1,2}^{(1)}|}.$$

Здесь, согласно (3), для «правого» канала ток в диполе «Y» задержан по фазе на α , а в «левом» — фазовый сдвиг равен $-\alpha$.

Из (5) следует, что

$$\psi_1^{(1)} = -\psi_2^{(2)}, \quad \psi_2^{(1)} = -\psi_1^{(2)}$$

и, значит, для компенсации в обоих каналах вместо двух управляемых фазовращателей можно ограничиться одним, который, например в «левом» канале, обеспечивает фазовый сдвиг

$$\chi = 180^\circ - (\psi_1^{(1)} - \psi_1^{(2)}),$$

на рис. 3 он изображен пунктиром.

Для выравнивания амплитуд полей ослабления k управляемых аттенюаторов в обеих цепочках оказываются одинаковыми (см. (5)):

$$k = k^{(1)} = k^{(2)} = \frac{|E_2^{(1)}|}{|E_2^{(2)}|} = \frac{|E_1^{(1)}|}{|E_1^{(2)}|}.$$

При компенсации в каналах составляющих $E_2^{(1)}$ и $E_1^{(2)}$ амплитуды выделяемых сигналов $E_1^{(1)}$ и $E_2^{(2)}$ уменьшаются и равны

$$|E_1^{(1)}|_k = |E_2^{(2)}|_k = |E_1^{(1)}| - \frac{|E_2^{(1)}|^2}{|E_2^{(2)}|}.$$

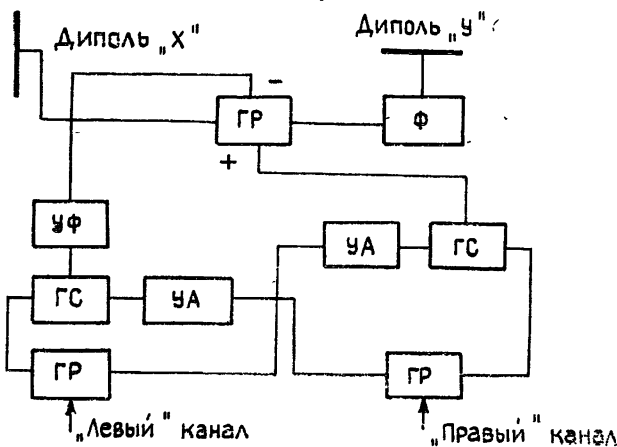


Рис. 4. Обозначения те же, что на рис. 3.

Что касается неуправляемых фазовращателей Φ (рис. 3), то величину вносимых ими фазовых сдвигов естественно выбрать в зависимости от сектора углов, в которых должна работать антенна. Так, для больших и умеренных углов места удобно выбрать их фазовый

сдвиг $\alpha = \pi/2$. Используя при этом гибридный разветвитель с суммарным и разностным выходами, можно существенно упростить схему (см. рис. 4). Также упрощаются и формулы (5):

$$\begin{aligned} |E_{1,2}^{(1)}| &= |E_{2,1}^{(2)}| = 1 \pm \sin \Delta, \\ \psi_{1,2}^{(1)} &= -\psi_{2,1}^{(2)} = 90^\circ - \varphi, \\ k &= \frac{1 + \sin \Delta}{1 - \sin \Delta}, \quad \chi = 2\varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Два взаимно перпендикулярных диполя Герца над землей. Для учета влияния земли рассмотрим приемный режим. Тогда (1) будут описывать составляющие падающей волны. Обозначив

$$S = m \sin \alpha \text{ и } C = m \cos \alpha, \quad (9)$$

представим (1) в виде

$$E'_{\varphi, \Delta} = |E'_{\varphi, \Delta}| \exp(i\theta_{\varphi, \Delta}),$$

где

$$\begin{aligned} |E'_\varphi| &= [\sin^2 \varphi + m^2 \cos^2 \varphi - C \sin 2\varphi]^{1/2}, \\ |E'_\Delta| &= \sin \Delta [\cos^2 \varphi + m^2 \sin^2 \varphi + C \sin 2\varphi]^{1/2}, \\ \sin \theta_\varphi &= \frac{S \cos \varphi}{|E'_\varphi|}, \quad \cos \theta_\varphi = \frac{\sin \varphi - C \cos \varphi}{|E'_\varphi|}, \\ \sin \theta_\Delta &= \frac{S \sin \varphi \sin \Delta}{|E'_\Delta|}, \quad \cos \theta_\Delta = \sin \Delta \frac{\cos \varphi + C \sin \varphi}{|E'_\Delta|}. \end{aligned} \quad (10)$$

Умножая эти составляющие на соответствующие коэффициенты Френеля и учитывая, что диполи расположены над землей на высоте H , найдем отраженные волны, а затем составляющие результирующего поля:

$$\begin{aligned} E_\varphi &= A_\Gamma |E'_\varphi| \exp[i(\theta_\varphi - \psi_\Gamma)], \\ E_\Delta &= A_\Delta |E'_\Delta| \exp[i(\theta_\Delta - \psi_\Delta)], \end{aligned} \quad (11)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} 1 + f_{\Gamma, \Delta} e^{-i\Phi'_{\Gamma, \Delta}} &= A_{\Gamma, \Delta} e^{-i\psi_{\Gamma, \Delta}}, \quad 1 - f_{\Gamma, \Delta} e^{-i\Phi'_{\Gamma, \Delta}} = A_{\Gamma, \Delta} e^{-i\psi'_{\Gamma, \Delta}}, \\ \Phi'_{\Gamma, \Delta} &= \Phi_{\Gamma, \Delta} + \frac{4\pi H \sin \Delta}{\lambda}. \end{aligned}$$

Здесь $f_{\Gamma, \Delta}$ и $\Phi_{\Gamma, \Delta}$ — модуль и фаза горизонтального и вертикального коэффициентов отражения, а λ — длина волны.

Итак, учет влияния земли сводится к замене выражения (1) на (11). После чего следует поступать, как и в случае свободного пространства. Так, для реализации схемы рис. 2 значения α и m легко вычислить по известным S и C (9), которые с учетом влияния земли оказываются равными

$$\begin{aligned} S^{(n)} &= [- (-1)^n A_\Gamma A_\Delta \cos(\psi_\Gamma + \psi_\Delta) \sin \Delta] \times \\ &\times [(A_\Gamma \cos \varphi)^2 + (A_\Delta \sin \varphi \sin \Delta)^2 + (-1)^n A_\Gamma A_\Delta \sin(\psi_\Gamma + \psi_\Delta) \sin 2\varphi \sin \Delta]^{-1}, \\ C^{(n)} &= [(A_\Gamma^2 - A_\Delta^2 \sin^2 \Delta) \sin \varphi \cos \varphi - (-1)^n A_\Gamma A_\Delta \sin(\psi_\Gamma + \psi_\Delta) \cos 2\varphi \sin \Delta] \times \end{aligned} \quad (12)$$

$$\times [(A_{\Gamma} \cos \varphi)^2 + (A_{\text{B}} \sin \varphi \sin \Delta)^2 + (-1)^n A_{\Gamma} A_{\text{B}} \sin (\psi_{\Gamma} + \psi_{\text{B}}) \sin 2\varphi \sin \Delta]^{-1}.$$

Здесь и ниже
$$n = \begin{cases} 1 & \text{— для «правого» канала} \\ 2 & \text{— для «левого» канала} \end{cases}$$

Как следует из (12), влияние земли проявляется в различных зависимостях амплитуд токов диполей и их фаз от координат в обоих каналах. Однако в случае идеально проводящей земли это различие исчезает, а m и α ведут себя, как и в свободном пространстве (3).

Учитывая влияние земли, вместо формул (5) и (8), описывающих соответственно схемы рис. 3 и 4, получим

$$\begin{aligned} |E_{1,2}^{(n)}| &= \{(A_{\Gamma} |E'_{\varphi}|)^2 + (A_{\text{B}} |E'_{\Delta}|)^2 \pm 2 A_{\Gamma} A_{\text{B}} |E'_{\varphi}| |E'_{\Delta}| \times \\ &\quad \times \sin [(\psi_{\text{B}} + \psi_{\Gamma}) - (-1)^n (\theta_{\Delta} - \theta_{\varphi})]\}^{-1/2}, \\ \sin \psi_{1,2}^{(n)} &= \frac{-A_{\Gamma} |E'_{\varphi}| \sin [\psi_{\Gamma} + (-1)^n \theta_{\varphi}] \mp A_{\text{B}} |E'_{\Delta}| \cos [\psi_{\text{B}} - (-1)^n \theta_{\Delta}]}{|E_{1,2}^{(n)}|}, \\ \cos \psi_{1,2}^{(n)} &= \frac{A_{\Gamma} |E'_{\varphi}| \cos [\psi_{\Gamma} + (-1)^n \theta_{\varphi}] \pm A_{\text{B}} |E'_{\Delta}| \sin [\psi_{\text{B}} - (-1)^n \theta_{\Delta}]}{|E_{1,2}^{(n)}|} \end{aligned} \quad (13)$$

и в частном случае, когда $\alpha = \pi/2$,

$$\begin{aligned} |E_{1,2}^{(n)}| &= [A_{\Gamma}^2 + (A_{\text{B}} \sin \Delta)^2 \mp (-1)^n 2 A_{\Gamma} A_{\text{B}} \sin \Delta \cos (\psi_{\Gamma} + \psi_{\text{B}})]^{1/2}, \\ \sin \psi_{1,2}^{(n)} &= \frac{-(-1)^n A_{\Gamma} \cos [\psi_{\Gamma} - (-1)^n \varphi] \pm A_{\text{B}} \sin \Delta \cos [\psi_{\text{B}} + (-1)^n \varphi]}{|E_{1,2}^{(n)}|}, \\ \cos \psi_{1,2}^{(n)} &= \frac{-(-1)^n A_{\Gamma} \sin [\psi_{\Gamma} - (-1)^n \varphi] \mp A_{\text{B}} \sin \Delta \sin [\psi_{\text{B}} - (-1)^n \varphi]}{|E_{1,2}^{(n)}|}. \end{aligned} \quad (14)$$

Как следует из (13), наличие земли приводит к тому, что параметры компенсирующих цепочек А и В (рис. 3) оказываются различными. Поэтому, строго говоря, управляющие фазовращатели в них не могут быть заменены одним, как в случае свободного пространства.

Количественные характеристики описанных выше схем приводятся во второй части работы в связи с выбором оптимальной схемы для полариметра декаметрового диапазона.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность Л. Г. Содину и А. В. Меню за полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг Г. З. Коротковолновые антенны. — М.: Связьиздат, 1962, с. 815.
2. Антонов А. В. Диссертация. Харьков, ИРЭ АН УССР, 1973.
3. Бобейко А. Л., Бовкун В. П., Брауде С. Я., Мень А. В., Сергиенко Ю. Ю. Интерферометр декаметрового диапазона радиоволн УРАН-1. В кн.: Антенны. — М.: Связь, 1978. Вып. 26, с. 121.

Институт радиопизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
12 июня 1985 г.,
после доработки
20 января 1986 г.

STEERABLE ARRAY WITH CIRCULAR POLARIZATION. I. CALCULATIVE EXPRESSIONS

L. L. Bazelyan

Some variants of the compensation schemes are considered providing simultaneous radiation (reception) in an arbitrary direction of the electromagnetic field of two circular polarizations of the contrary sign by two stationary mutually perpendicular fields placed in a free space and parallel above Earth.