

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОВОЛН

Ю. В. Шубарин, **Е. А. Васильева**

Харьков

При разработке, настройке и эксплуатации антенн и волноводных трактов с вращающимися полями возникнет необходимость в измерении поляризации поля. В литературе почти отсутствуют данные точности различных методов поляризационных измерений.

Анализ поляризационной структуры радиоволн, т. е. измерение коэффициента эллиптичности, угла ориентации и направления вращения векторов поля, основан на разложении поля на линейные или круговые компоненты. В связи с этим известны [1, 2] следующие методы измерений: метод одной линейно-поляризованной антенны (1ЛПА), метод двух линейно-поляризованных антенн (2ЛПА) и метод двух антенн с круговой поляризацией (2КПА).

Цель данной статьи — оценка погрешностей поляризационных измерений этими методами.

Погрешности различных методов измерения поляризационных параметров

Погрешности метода 1ЛПА. Коэффициент эллиптичности поляризации (к. э. п.), т. е. отношение малой полуоси поляризационного эллипса, в этом методе определяется как отношение минимального P_b и максимального P_a сигналов при повороте антенны анализатора вокруг направления распространения принимаемой волны $r = (P_b/P_a)^{\frac{1}{2}}$.

Погрешности в измерении коэффициента эллиптичности вызываются неточностью установки плоскости поляризации антенны анализатора в положениях, необходимых для измерения P_a и P_b , неточностью самих измерений и приемом антенной анализатора поля поперечной поляризации.

Полная погрешность Δr при измерении к. э. п. складывается из случайных погрешностей за счет неточности установки плоскости поляризации анализатора $\Delta r_{уст} = \frac{1}{\sqrt{2}} k_p r$ (k_p — коэффициент пропорциональности); неточности измерений с помощью аттенюатора $\Delta r_{изм} = -0,23r \Delta A_{дб}$ ($\Delta A_{дб}$ — по-

грешность аттенюатора, δb) и постоянной погрешности за счет приема поля поперечной поляризации $\Delta r_{\text{поп}} = \frac{\alpha}{2r} (1 - r^4)$, где α — коэффициент, характеризующий прием мощности поля поперечной поляризации.

Таким образом,

$$\Delta r = \sqrt{\Delta r_{\text{уст}}^2 + \Delta r_{\text{взм}}^2} + \Delta r_{\text{поп}}. \quad (1)$$

При измерении угла ориентации (у. о.) эллипса β полная погрешность $\Delta\beta$ вызывается теми же причинами, что и при измерении к. э. п., и равна

$$\Delta\beta = \sqrt{\Delta\beta_{\text{уст}}^2 + \Delta\beta_{\text{взм}}^2} + \Delta\beta_{\text{пом}}, \quad (2)$$

где слагаемые определяются по формулам

$$\Delta\beta_{\text{уст}} = \sqrt{\frac{k_p}{1-r^2}}, \quad \Delta\beta_{\text{пом}} = \sqrt{\alpha k_p}.$$

Учтено, что $\alpha \ll 1$ и измерения проводятся по большой полуоси. В этом случае погрешности меньше.

Погрешности метода 2ЛПА. Погрешности измерений в определении к. э. п. r и у. о. β равны

$$\Delta r = \frac{r(U+1)^2}{2U(r^2 \sin^2 \psi - \cos^2 \psi) - U^2 - 1} \sqrt{\left[\left(\frac{U-1}{U+1}\right) \frac{\Delta U}{2U}\right]^2 + (\Delta\psi \operatorname{ctg} \psi)^2}, \quad (3)$$

$$\Delta\beta = \frac{0,5 \operatorname{tg} 2\beta}{\left(\frac{1+U}{1-U}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \psi} \sqrt{\left[\frac{2}{(1-U)^2 \sin^2 2\beta} - \frac{1+U}{(1-U)^2} + \frac{\operatorname{tg}^2 \psi}{1-U}\right]^2 \Delta U^2 + \left(\frac{\operatorname{tg} \psi}{\cos^2 \psi}\right)^2 \Delta\psi^2}, \quad (4)$$

где U , ΔU — отношение мощностей в нагрузках антенн и погрешность его измерения; ψ , $\Delta\psi$ — разность фаз наводимых в антеннах э. д. с. и погрешность ее измерения.

Отметим, что если полуоси эллипса совпадают с плоскостями поляризации антенн, в этом случае формулы (3) и (4) упрощаются:

$$\Delta r = \frac{\Delta U}{2r} \quad \text{и} \quad \Delta\beta = \frac{r}{1-r^2} \Delta\psi.$$

Полная погрешность в измерении отношения мощностей, принимаемых на две антенны, следующая:

$$\Delta U = \Delta U_{\text{взм}} + \Delta U_{\text{уст}} + \Delta U_{\text{поп}} + \Delta U_G, \quad (5)$$

где $\Delta U_{\text{взм}} = 0,325U\Delta A_{\text{дб}}$ — погрешность при измерении с помощью аттенюатора; $\Delta U_{\text{уст}} = \frac{0,25U(1-r^2)^2 \sin 4\beta \Delta\beta}{r^2 + 0,25(1-r^2)^2 \sin^2 2\beta}$ — погрешность за счет неортогональности плоскостей поляризации; $\Delta U_{\text{поп}} = \alpha(1-U)^2$ — погрешность за счет приема антенной поля поперечной поляризации; $\Delta U_G = 2 \frac{\Delta G}{G_0} U$ — погрешность за счет отклонения ΔG коэффициентов усиления антенн от расчетного значения G_0 .

Погрешность в измерении разности фаз сигналов $\Delta\psi$ определяется погрешностью измерительного прибора — фазометра $\Delta\psi_{\text{взм}}$, погрешностью за счет неортогональности плоскостей поляризации $\Delta\psi_{\text{уст}}$ и приемом поля поперечной поляризации $\Delta\psi_{\text{поп}}$:

$$\Delta\psi = \Delta\psi_{\text{взм}} + \Delta\psi_{\text{уст}} + \Delta\psi_{\text{поп}}, \quad (6)$$

где

$$\Delta\psi = \frac{0,5(1+r^2)r\Delta\beta_1}{r^2 + 0,25(1-r^2)\sin^2 2\beta}, \quad \Delta\psi_{\text{поп}} = \sqrt{\alpha} \left(\sqrt{U} + \frac{1}{\sqrt{U}} \right).$$

Погрешность метода 2КПА. В этом случае полная погрешность в измерении коэффициента эллиптичности

$$\Delta r = \Delta r_{\text{изм}} + \Delta r_G + \Delta r_{\text{поп}}, \quad (7)$$

где

$$\Delta r_{\text{изм}} = \frac{k_p}{2\sqrt{2}} (1 - r^2); \quad \Delta r_G = \frac{\Delta G}{2G_0} (1 - r^2); \quad \Delta r_{\text{поп}} = 2ar \frac{1 + r^2}{1 - r^2}.$$

А полная погрешность в измерении угла ориентации поляризационного эллипса

$$\Delta \beta = \frac{1}{2} \Delta \psi = \frac{1}{2} (\Delta \psi_{\text{уст}} + \Delta \psi_{\text{изм}} + \Delta \psi_{\text{поп}}). \quad (8)$$

Она определяется ошибкой за счет неодинаковой ориентации антенн $\Delta \psi_{\text{уст}}$, ошибкой измерительного прибора — фазометра $\Delta \psi_{\text{изм}}$ и ошибкой за счет приема поля поперечной поляризации $\Delta \psi_{\text{поп}} = 2\sqrt{\alpha} \frac{1 + r^2}{1 - r^2}$.

Оценка погрешностей в измерениях коэффициента эллиптичности и угла ориентации различными методами

Для оценки точности трех методов расчет погрешностей произведен при следующих условиях: точность измерения мощности принимаемого сигнала определяется по шкале стрелочного измерительного прибора $k_p = 1/50 = 0,02$; точность измерения мощности сигнала — с помощью аттеню-

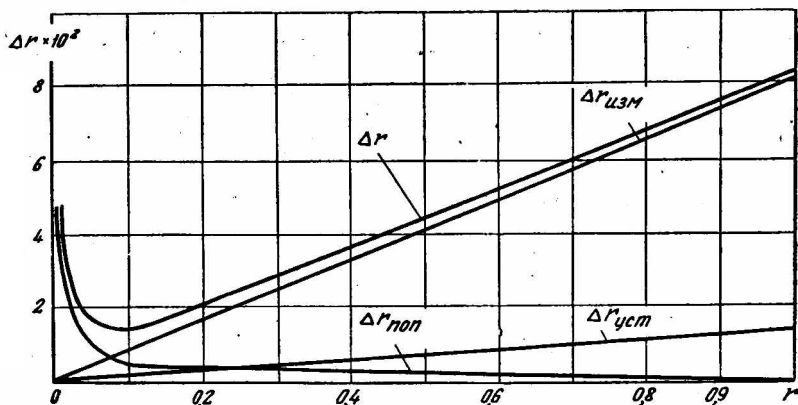


Рис. 1. Погрешности измерения коэффициента эллиптичности методом одной линейно поляризованной антенны.

атора $\Delta A = 0,5$ дб; ослабление поля поперечной поляризации $\alpha_{\text{дб}} = 30$ дб или $\alpha = 10^{-3}$; различие в коэффициентах усиления антенн не более 0,2 дб; погрешность фазометра (фазовращателя) $\Delta \psi_{\text{изм}} = 5^\circ$; погрешность в измерении угла поворота линейно поляризованной антенны — 1° ; погрешность в ортогональности плоскостей поляризации $\Delta \psi = 5^\circ$; в ориентации поляризованных по кругу антенн $\Delta \beta_1 = 5^\circ$.

Погрешности метода 1ЛПА рассчитаны по формулам (1) и (2).

Из графика (рис. 1) видно, что для метода 1ЛПА погрешность в измерении коэффициента эллиптичности обращается в бесконечность при $r = 0$; с увеличением r она сначала резко падает, принимая минимальное значение при $r = 0,1$, а затем монотонно возрастает приблизительно по линейному закону.

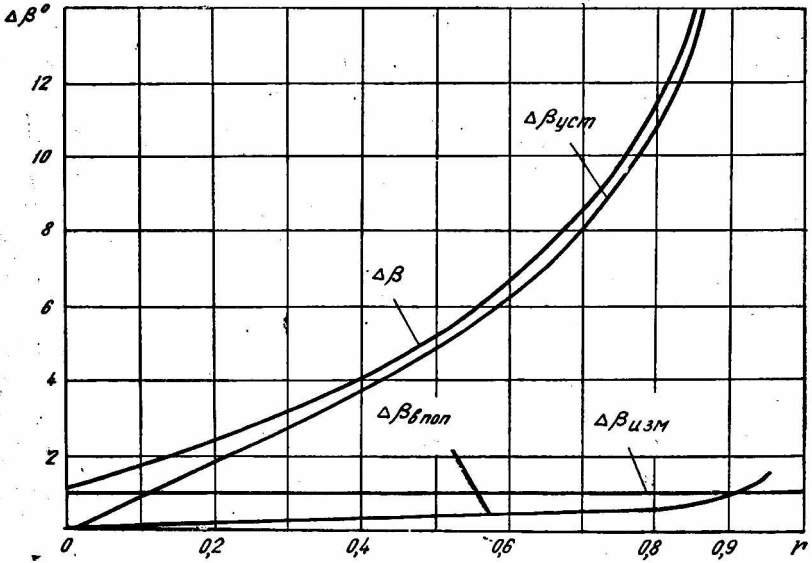


Рис. 2. Погрешности измерения угла ориентации поляризационного эллипса методом одной линейной поляризованной антенны.

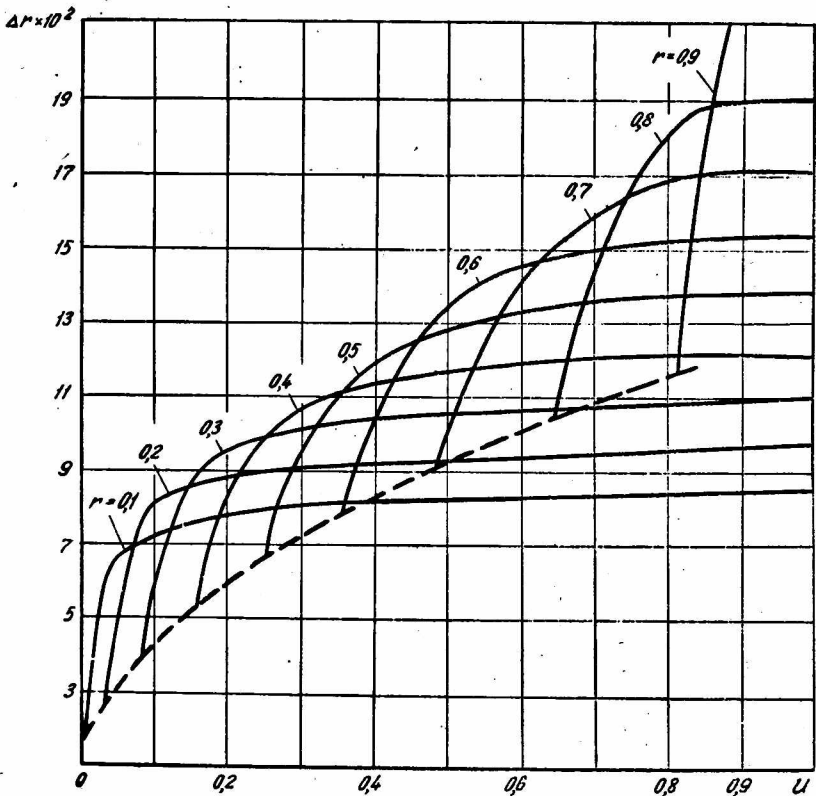


Рис. 3. Погрешности измерения коэффициента эллиптичности методом двух линейно поляризованных антенн.

Ошибки в определении коэффициента эллиптичности за счет неточности измерений с помощью аттенуатора $\Delta r_{\text{изм}}$ и за счет установки плоскости поляризации $\Delta r_{\text{уст}}$ с увеличением r линейно возрастают, а ошибка за счет приема поля поперечной поляризации $\Delta r_{\text{поп}}$ уменьшается от бесконечности до нуля. Наибольшей, начиная с $r \cong 0,1$, является погрешность за счет неточности измерений с помощью аттенуатора $\Delta r_{\text{изм}}$.

Следовательно, необходимо применять приборы, измеряющие мощность сигнала с наименьшей погрешностью.

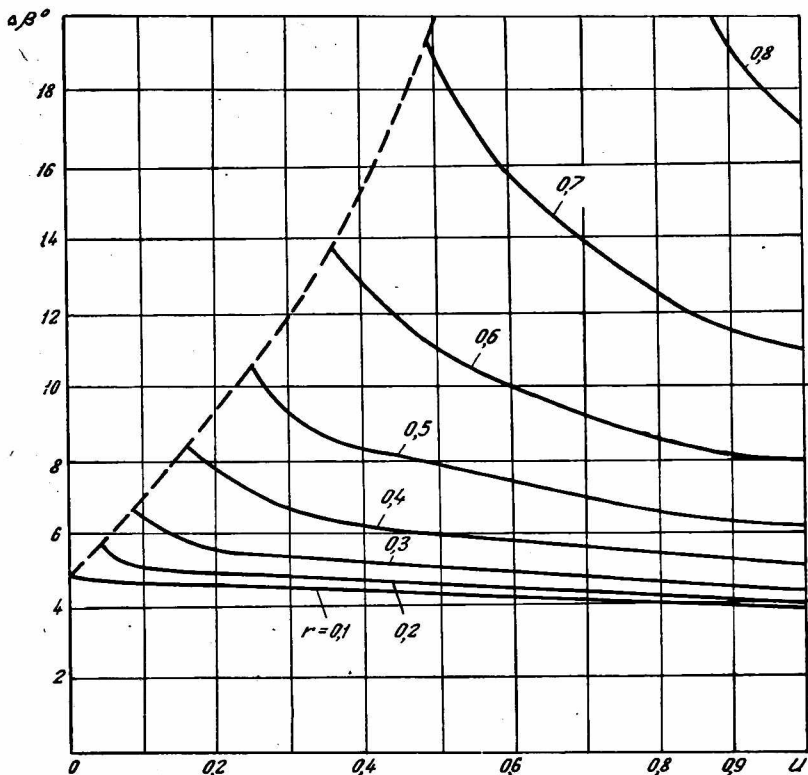


Рис. 4. Погрешности измерения угла ориентации методом двух линейно поляризованных антенн.

Погрешность в измерении угла ориентации (рис. 2) монотонно возрастает от минимального значения порядка 1° при поляризации, близкой к линейной, и стремится к бесконечности, если поляризация приближается к круговой. Величину и характер погрешности в измерении угла ориентации $\Delta\beta$ в основном определяет составляющая полной погрешности $\Delta\beta_{\text{уст}}$ за счет установки плоскости поляризации приемной антенны. Эта погрешность возрастает с увеличением r , стремясь к бесконечности при $r = 1$.

Погрешность за счет приема поля поперечной поляризации $\Delta\beta_{\text{поп}}$ является наименьшей из всех частичных ошибок при $r < 0,9$, а при $r > 0,9$ резко возрастает и при $r = 1$ стремится к бесконечности, а погрешность в определении у. о. $\Delta\beta_{\text{изм}}$ — за счет неточности отсчета по шкале углов с изменением r остается постоянной.

По формулам (3), (4) рассчитаны погрешности метода 2ЛПА.

Как видно из графика (рис. 3), погрешность в измерении коэффициента эллиптичности возрастает с увеличением r и изменяется в небольших пределах с изменением отношения мощностей U , принимаемых на ортогональ-

поляризованные антенны, исключая значения U , близкие r^2 , где Δr достигает минимальных значений. Последнее соответствует частному случаю (пунктирная кривая, рис. 3), когда полуоси эллипса совпадают с плоскостями поляризации приемных антенн.

Из графика рис. 4 видно, что погрешность в измерении угла ориентации возрастает с увеличением r и уменьшается с увеличением отношения мощностей U , принимаемых на ортогонально поляризованные антенны. Однако при увеличении r в пределах от 0 до 0,5 погрешность возрастает не более чем в два раза, причем сохраняется приблизительно постоянной при изменении U . При $r = U^2$, что соответствует частному случаю

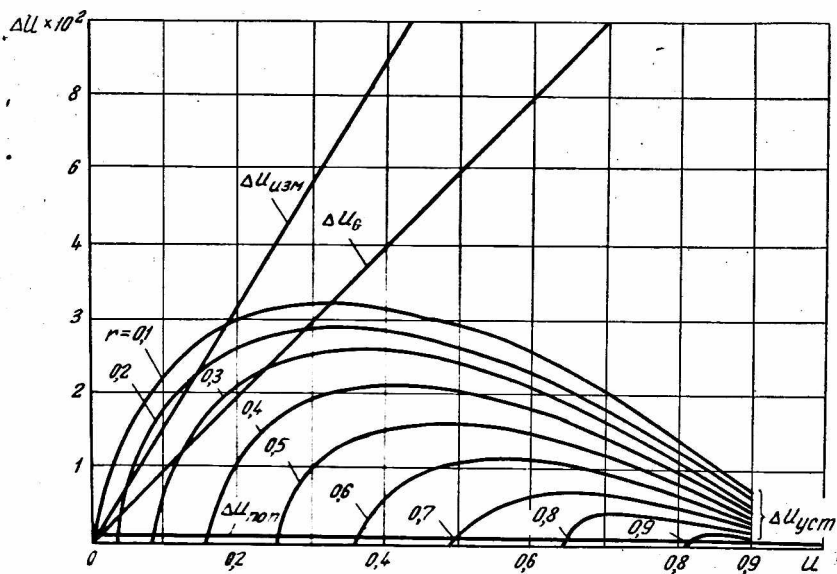


Рис. 5. Погрешности в измерении отношения мощностей ортогональных линейно поляризованных компонент, вызванные различными причинами.

совпадения плоскостей поляризации с полуосями эллипса, погрешности в определении угла ориентации максимальны (пунктирная кривая, рис. 4).

На графиках рис. 5 представлены составляющие полной погрешности в измерении отношения мощностей ΔU , принимаемых на две антенны. Ошибки $\Delta U_{изм}$ и ΔU_{β} возрастают по линейному закону и не зависят от r , а ошибка $\Delta U_{пол}$ пренебрежимо мала и уменьшается с увеличением U . Ошибка $\Delta U_{уст}$ с увеличением r уменьшается. Для фиксированных значений r $\Delta U_{уст}$ вначале растет с увеличением U , достигая своего максимума, а затем падает до 0. Наибольшую величину при всех r имеет ошибка $\Delta U_{изм}$, исключая значения $r < 0,2$ при $U < 1,5$.

Как видно из графика рис. 6, погрешность в измерении разности фаз сигналов, принимаемых на две антенны за счет поля поперечной поляризации $\Delta \psi_{пов}$, не зависит от r и монотонно уменьшается с увеличением отношения мощностей U . Она минимальна, когда $U = 1$, т. е. $\beta = 45^\circ$.

Ошибка за счет неортогональности плоскостей поляризации $\Delta \psi_{уст}$ с увеличением r увеличивается, при постоянном r монотонно уменьшается с увеличением U и минимальна при $\beta = 45^\circ$ аналогично $\Delta \psi_{пов}$.

От r и U не зависит ошибка фазометра $\Delta \psi_{изм}$, а по величине, начиная с определенных значений U , для каждого r превосходит ошибки $\Delta \psi_{уст}$ и $\Delta \psi_{пов}$.

Графики погрешностей метода 2КПА рассчитаны по формулам (7) и (8). С приближением поляризации к круговой погрешность в измерении коэффициента эллиптичности (рис. 7) сначала уменьшается, достигая минимума при $r = 0,8 \div 0,9$, а затем резко возрастает.

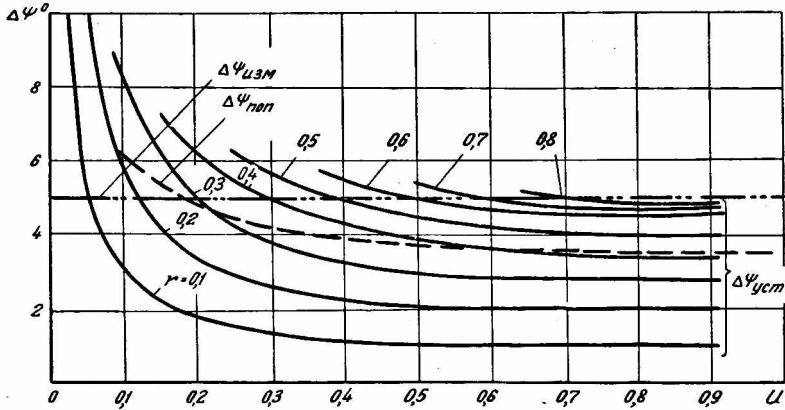


Рис. 6. Погрешности в измерении разности фаз ортогональных, линейно поляризованных компонент, вызванные разными причинами.

Погрешность $\Delta r_{изм}$, определяемая измерительным прибором, и Δr_G за счет различия коэффициентов усиления антенн с увеличением r уменьшаются до 0, а ошибка за счет поля поперечной поляризации $\Delta r_{пол}$ при увеличении r возрастает, стремясь к бесконечности.

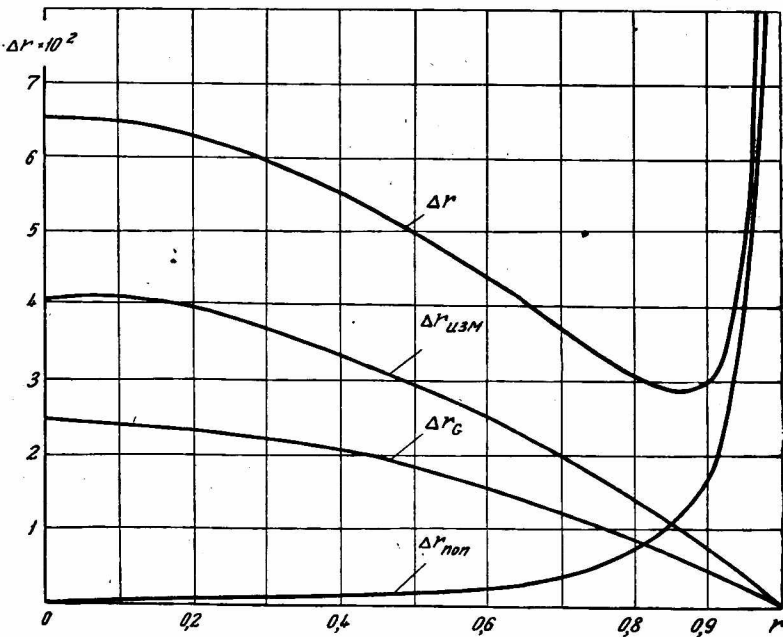


Рис. 7. Погрешности измерения коэффициента эллиптичности методом двух кругополяризованных антенн.

Наибольшее влияние на полную погрешность в измерении коэффициента эллиптичности оказывает погрешность $\Delta r_{изм}$ при $r < 0,85$; при $r > 0,85$ полная ошибка определяется ошибкой $\Delta r_{пол}$.

Погрешность в измерении угла ориентации (рис. 8) монотонно возрастает с увеличением r и стремится к бесконечности, когда поляризация приближается к круговой. Аналогично изменяется ошибка за счет поперечной поляризации $\Delta\beta_{\text{поп}}$. От r не зависит погрешность фазометра $\Delta\beta_{\text{изм}}$ и погрешность за счет неодинаковой ориентации антенн $\Delta\beta_{\text{уст}}$.

Сравнивая графики (рис. 1, 3, 7), можно отметить, что погрешность в измерении коэффициента эллиптичности методом 2ЛПА наибольшая.

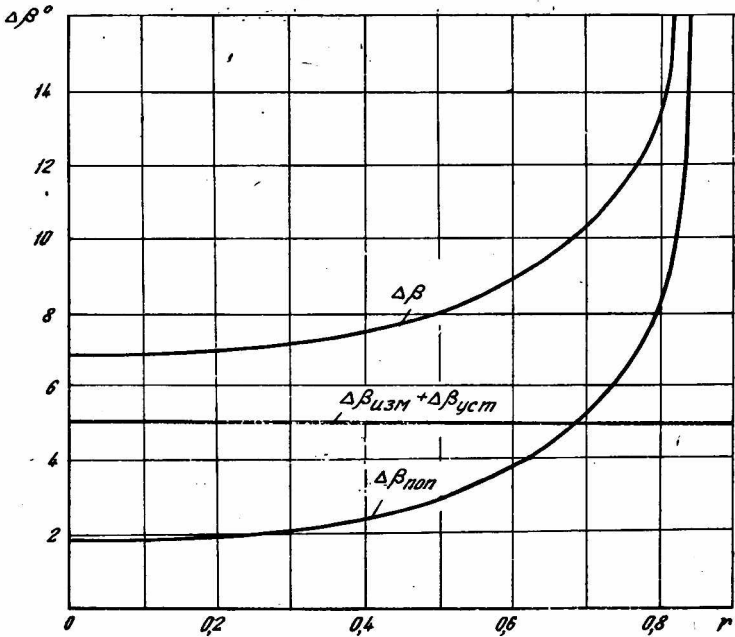


Рис. 8. Погрешности измерения угла ориентации поляризационного эллипса методом двух кругополяризованных антенн.

При $r < 0,5$ коэффициент эллиптичности методом 1ЛПА определяется с меньшими погрешностями, чем методом 2КПА, а при $r > 0,5$ меньшую погрешность дает метод 2КПА.

Сравнивая графики (рис. 2, 4, 8), можно отметить, что метод 2ЛПА дает более низкую точность и при нахождении угла ориентации.

Метод 1ЛПА дает наименьшую погрешность при измерении как коэффициента эллиптичности, так и угла ориентации по сравнению с методами 2ЛПА, особенно при малых r . Таким образом, из рассмотренных методов наиболее простым и точным является метод 1ЛПА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антенны эллиптической поляризации. Сб. статей под ред. А. И. Шпунтова. Изд-во иностр. лит., 1961.
2. J. D. Kraus. Antennas. Mc-Graw-Hill, Book. Co, 1950.