

УДК 621.396.96

С. А. РЕБРОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

О ПОСТРОЕНИИ АЛГОРИТМА КАЛИБРОВКИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ РЛС

Рассмотрено построение математического алгоритма внешней калибровки поляриметрических РЛС для общего случая проведения поляриметрических измерений (раздельные каналы на прием и передачу при двух ортогональных рабочих поляризациях). Приведены условия выбора поляризационной матрицы рассеяния для калибровочной цели. Представлены результаты имитационного математического моделирования для некоторых типов пассивных радиолокационных отражателей, часто используемых в качестве калибровочных целей. На основе анализа результатов моделирования сделаны выводы об ограниченности применения пассивных отражателей для поляриметрической калибровки. Предложено применение активных систем калибровки.

поляриметрия, калибровка, калибровочная цель, поляризационная матрица рассеяния

Введение

Для решения задач обнаружения и распознавания радиолокационных (РЛ) объектов все шире применяются поляриметрические РЛС (ПРЛС), определяющие электрофизические характеристики РЛ объектов [1] за счет получения полной поляризационной матрицы рассеяния по результатам количественных измерений параметров поляриметрических сигналов, отраженных исследуемыми объектами. При этом методы снижения погрешности измерений, проводимых с помощью ПРЛС, должны учитывать особенности функционирования [2] подобных радиолокационных систем. В публикации рассматривается построение математического алгоритма внешней калибровки поляриметрических РЛС для общего случая проведения поляриметрических измерений (раздельные каналы на прием и передачу при двух ортогональных рабочих поляризациях).

1. Условия проведения измерений

Предварительная калибровка, проводимая изготовителем ПРЛС, позволяет определить уровень паразитной кроссполяризации и снизить его путем регулировки антенно-волноводных трактов. Однако транспортировка, изменение условий работы ПРЛС после монтажа на носителе приводит к изменению

уровня паразитных связей между приемопередающими трактами ортогональных поляризаций, что делает необходимым калибровку станции в рабочем режиме в целях определения текущих поправочных коэффициентов для программы обработки данных.

Для идеального поляриметрического радиолокатора измеренная матрица рассеяния S_m точечной цели совпадает с ее теоретической (или истинной) матрицей рассеяния S_p . Для реального радиолокатора необходимо определить погрешность, вносимую в переданный и принятый сигналы, и восстановить S_p .

Постановка задачи может быть пояснена с помощью схемы, представленной на рис. 1. Передающая антенна должна излучать сигнал на вертикальной поляризации с амплитудой E_0 , но поскольку система не идеальна, излучаемое поле напряженностью E^t содержит кроме вертикально поляризованной компоненты $t'_{vv}E_0$ и горизонтально поляризованную компоненту $t'_{vh}E_0$:

$$E^t = E_0 \begin{bmatrix} t'_{vv} \\ t'_{vh} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где t'_{vv} – амплитуда и фаза ошибки в передаваемом сигнале; t'_{hv} – коэффициент связи между V-каналом и H-каналом передатчика.

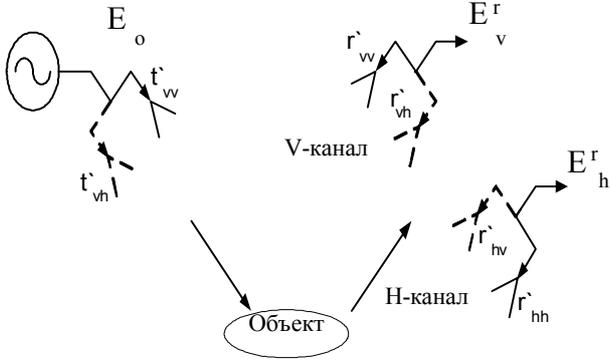


Рис. 1. Погрешность при поляриметрических измерениях

Реальный двухканальный приемник подобно передатчику имеет ошибки, связанные с каждым из каналов. Представляя амплитудную и фазовую ошибку в первом канале как r'_{aa} и коэффициент связи первого и второго каналов как r'_{ab} , где a и b – поляризации, на которые настроен соответствующий приемный канал, согласно с основным уравнением радиолокации [3] выражение для напряженности поля, отраженного объектом, удаленным на расстояние r от приемника и имеющим матрицу рассеяния \mathbf{S}_p , можно записать так:

$$\mathbf{E}^r = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_v^r \\ \mathbf{E}_h^r \end{bmatrix} = e^{i\phi} \frac{K}{r^2} \begin{bmatrix} r'_{vv} & r'_{vh} \\ r'_{hv} & r'_{hh} \end{bmatrix} \mathbf{S}_p \begin{bmatrix} t'_{vv} \\ t'_{vh} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$K = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{2\eta_0 P_t G_t G_r}; \quad (3)$$

$P_t = E_0^2 / 2\eta_0$ – излучаемая мощность; G_t и G_r – коэффициенты усиления приемной и предающей антенн; ϕ – фазовый множитель, характеризующий распространение волны до цели и обратно до приемной антенны.

В режиме излучения на горизонтальной поляризации также применимо выражение (2), если t'_{vv} и t'_{vh} заменить на t'_{hh} и t'_{hv} соответственно. Объединяя два режима передачи, можно записать

$$\mathbf{E}^r = e^{i\phi} \frac{K}{r^2} \mathbf{RTS}_p \bar{\mathbf{p}}^t, \quad (4)$$

где $\bar{\mathbf{p}}^t$ – вектор-столбец, описывающий поляризацию излучаемого сигнала (идеальную), а \mathbf{R} и \mathbf{T} – матрицы искажений при приеме и передаче соответственно.

Нормируя матрицы искажений на соответствующий рабочей поляризации элемент, получим:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & r_{vh} \\ r_{hv} & r_{hh} \end{bmatrix} \text{ и } \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & t_{vh} \\ t_{hv} & t_{hh} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $r_{ab} = r'_{ab} / r'_{vv}$ и $t_{ab} = t'_{ab} / t'_{vv}$; $ab \in \{vh, hv, hh\}$.

Если в поляризационных каналах искажения отсутствуют, т.е.

$$\mathbf{R} = \mathbf{T} = \mathbf{I},$$

где \mathbf{I} – единичная матрица, и $r'_{vv} = t'_{vv} = 1$, то система из четырех измерений, соответствующих видам поляризации VV, VH, HV, HH, определяет “истинную” поляризационную матрицу рассеяния \mathbf{S}_p цели [2]:

$$\mathbf{E}^r = \frac{K}{r^2} \mathbf{S}_p \bar{\mathbf{p}}^t. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом (1) и (4), получаем выражение для реально измеряемой ПМП:

$$\mathbf{S}_m = e^{i\phi} \mathbf{RS}_p \mathbf{T}. \quad (7)$$

Поскольку \mathbf{S}_m поддается непосредственному измерению, цель калибровки состоит в определении \mathbf{R} и \mathbf{T} для того, чтобы можно было из (7) найти истинную матрицу рассеяния \mathbf{S}_p объекта.

2. Восстановление истинной ПМР объекта по непосредственно измеренной

Как правило, для полной калибровки необходимо измерение трех целей с известными ПМР [5]. Вводя соответствующие индексы, получаем три матричных уравнения:

$$\mathbf{S}_{mj} = e^{i\phi_j} \mathbf{R} \mathbf{S}_{pj} \mathbf{T}, \quad (8)$$

где $j = 1, 2, 3$.

После умножения \mathbf{S}_{m2} и \mathbf{S}_{m3} на \mathbf{S}_{m1}^{-1} и введения для произведений обозначений \mathbf{S}_{mT} и $\bar{\mathbf{S}}_{mT}$ можно получить преобразование подобия:

$$\mathbf{S}_{mT} = e^{i(\phi_2 - \phi_1)} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{S}_{pT} \mathbf{T}, \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{mT} = e^{i(\phi_3 - \phi_1)} \mathbf{T}^{-1} \bar{\mathbf{S}}_{pT} \mathbf{T}, \quad (10)$$

где

$$\mathbf{S}_{mT} = \mathbf{S}_{m1}^{-1} \mathbf{S}_{m2};$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{mT} = \mathbf{S}_{m1}^{-1} \mathbf{S}_{m3};$$

$$\mathbf{S}_{pT} = \mathbf{S}_{p1}^{-1} \mathbf{S}_{p2};$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{pT} = \mathbf{S}_{p1}^{-1} \mathbf{S}_{p3}.$$

Необходимо отметить, что эти уравнения зависят только от матрицы искажений \mathbf{T} , зависимость от матрицы \mathbf{R} исключена.

Для решения (9) и (10) относительно \mathbf{T} следует принять во внимание основное свойство собственных значений и собственных векторов матриц [4]. Собственные значения и собственные векторы матриц \mathbf{N}_T и \mathbf{P}_T в выражении (9) должны удовлетворять соотношениям

$$\mathbf{S}_{pT} \mathbf{X}_T = \mathbf{X}_T \Lambda'_T, \quad (11)$$

$$\mathbf{S}_{mT} \mathbf{Y}_T = \mathbf{Y}_T \Lambda_T, \quad (12)$$

где Λ'_T и Λ_T – диагональные матрицы, образованные соответственно собственными значениями матриц \mathbf{S}_{mT} и \mathbf{S}_{pT} . Соответствующие собствен-

ные векторы образуют столбцы матриц \mathbf{X}_T и \mathbf{Y}_T .

Кроме того, собственные значения и собственные векторы связаны выражениями

$$\Lambda'_T = \Lambda_T e^{i(\phi_1 - \phi_2)}, \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}_T = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{X}_T. \quad (14)$$

При заданной матрице Λ'_T два собственных значения в матрице Λ_T должны быть определены так, чтобы удовлетворять соотношению (13). Ошибки в ориентации калибровочных целей влияют на модули собственных значений гораздо сильнее, чем на их фазы [5], следовательно, собственные значения должны быть определены в соответствии с фазой соотношения (13). Если

$$\Lambda'_T = \begin{Bmatrix} \lambda'_1 & 0 \\ 0 & \lambda'_2 \end{Bmatrix},$$

а собственные значения матрицы \mathbf{S}_{mT} равны λ_1 и

λ_2 , то Λ_T выбирается в следующем виде:

$$\Lambda_T = \begin{cases} \begin{Bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{Bmatrix} & \text{при } \left| \text{ctg} \frac{\lambda'_1 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda'_2} \right| < \left| \text{ctg} \frac{\lambda'_1 \lambda_1}{\lambda_2 \lambda'_2} \right|, \\ \begin{Bmatrix} \lambda_2 & 0 \\ 0 & \lambda_1 \end{Bmatrix} & \text{в ином случае.} \end{cases} \quad (15)$$

Уравнение (14) неоднозначно определяет \mathbf{T} , так как собственные векторы, входящие в \mathbf{X}_T и \mathbf{Y}_T , имеют произвольные масштабные коэффициенты. После их надлежащего выбора матрица \mathbf{T} определяется однозначно следующим образом:

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}_T \mathbf{C} \mathbf{Y}_T^{-1}, \quad (16)$$

где $\mathbf{C} = \text{diag}(c_1, c_2)$ – диагональная матрица с неизвестными ненулевыми элементами.

При выводе соотношения (16) было сделано предположение, что \mathbf{X}_T и \mathbf{Y}_T обращаемы. Если собственные значения матрицы \mathbf{S}_{pT} различны, то соответствующие собственные векторы линейно независимы, а матрица \mathbf{X}_T обращается. Матрица \mathbf{Y}_T обращается тогда и только тогда, когда обра-

шаема матрица \mathbf{X}_T [4]. Нетрудно показать, что собственные значения матрицы \mathbf{S}_{pT} будут различными, если [4]

$$4\det(\mathbf{S}_{pT}) \neq [\operatorname{tr}(\mathbf{S}_{pT})]^2, \quad (17)$$

где $\det(\bullet)$ – детерминант матрицы; $\operatorname{tr}(\bullet)$ – ее след.

Действительно, собственные значения матрицы \mathbf{S}_{pT} равны

$$p_{1,2} = \frac{\operatorname{tr}(\mathbf{S}_{pT})}{2} \pm \left[\left(\frac{\operatorname{tr}(\mathbf{S}_{pT})}{2} \right)^2 + \det(\mathbf{S}_{pT}) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Условие $p_1 \neq p_2$ выполняется, если выражение под корнем не равно нулю:

$$[\operatorname{tr}(\mathbf{S}_{pT})]^2 + 4\det(\mathbf{S}_{pT}) \neq 0,$$

откуда следует условие (17).

Следовательно, для калибровки поляриметрической РЛС необходим набор целей, ПМР которых удовлетворяет условию (17).

На основе соотношения (10) можно получить еще одно матричное соотношение для \mathbf{T} :

$$\mathbf{T} = \bar{\mathbf{X}}_T \bar{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{Y}}_T^{-1}, \quad (18)$$

где $\bar{\mathbf{C}} = \operatorname{diag}(\bar{c}_1, \bar{c}_2)$ – диагональная матрица с неравными нулю неизвестными коэффициентами, а собственные значения и векторы матриц \mathbf{S}_{pT} и

\mathbf{S}_{mT} представлены матрицами $\bar{\Lambda}_T$, $\bar{\Lambda}_T$, $\bar{\mathbf{X}}_T$, $\bar{\mathbf{Y}}_T$.

Приравняв выражения (16) и (18) и перегруппировав члены, получаем соотношение

$$\mathbf{C} \mathbf{Y}_T^{-1} \bar{\mathbf{Y}}_T = \mathbf{X}_T^{-1} \bar{\mathbf{X}}_T \bar{\mathbf{C}}. \quad (19)$$

Решая (19) относительно $\frac{c_2}{c_1}$ и $\frac{\bar{c}_2}{\bar{c}_1}$ можно полу-

чить

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{(x_{11}\bar{x}_{21} - x_{21}\bar{x}_{11})(y_{22}\bar{y}_{11} - y_{12}\bar{y}_{21})}{(x_{22}\bar{x}_{12} - x_{12}\bar{x}_{22})(y_{11}\bar{y}_{21} - y_{21}\bar{y}_{11})}, \quad (20)$$

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{(x_{11}\bar{x}_{22} - x_{21}\bar{x}_{12})(y_{22}\bar{y}_{12} - y_{12}\bar{y}_{22})}{(x_{22}\bar{x}_{12} - x_{12}\bar{x}_{22})(y_{11}\bar{y}_{22} - y_{21}\bar{y}_{12})}, \quad (21)$$

$$\frac{\bar{c}_2}{\bar{c}_1} = \frac{(x_{22}\bar{x}_{11} - x_{12}\bar{x}_{21})(y_{22}\bar{y}_{12} - y_{12}\bar{y}_{22})}{(x_{22}\bar{x}_{12} - x_{12}\bar{x}_{22})(y_{22}\bar{y}_{11} - y_{12}\bar{y}_{21})}, \quad (22)$$

$$\frac{\bar{c}_2}{\bar{c}_1} = \frac{(x_{11}\bar{x}_{21} - x_{21}\bar{x}_{11})(y_{11}\bar{y}_{22} - y_{21}\bar{y}_{12})}{(x_{11}\bar{x}_{22} - x_{21}\bar{x}_{12})(y_{11}\bar{y}_{21} - y_{21}\bar{y}_{11})}, \quad (23)$$

где x_{mn} , \bar{x}_{mn} , y_{mn} , \bar{y}_{mn} – соответствующие элементы матриц \mathbf{X}_T , $\bar{\mathbf{X}}_T$, \mathbf{Y}_T , $\bar{\mathbf{Y}}_T$.

Для того чтобы гарантировать полную определенность всех выражений (20) – (23), на ПМР калибровочных целей должны быть наложены дополнительные ограничения. На основе условия (17) и аналогичных ограничений для \mathbf{S}_{pT} можно считать,

что \mathbf{X}_T^{-1} , $\bar{\mathbf{X}}_T$ не обращаемы и имеют нулевой де-

терминант. Легко показать, что как $\frac{c_2}{c_1}$, так и $\frac{\bar{c}_2}{\bar{c}_1}$

можно найти с помощью выражений (20) – (23) тогда и только тогда, когда

$$\bar{\mathbf{X}}_T \neq \mathbf{X}_T \mathbf{a}, \quad \bar{\mathbf{X}}_T \neq \mathbf{X}_T \mathbf{\beta}, \quad (24)$$

где

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\beta} = \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 \\ \beta_2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Это ограничение соответствует тому, что матрицы $\bar{\mathbf{S}}_{pT}$ и \mathbf{S}_{pT} могут иметь не более одного общего собственного вектора.

Матрицу искажений \mathbf{T} можно определить по (16) или (18). Так как матрица \mathbf{T} нормирована, ее первый элемент определяется из условия

$$\frac{c_1 x_{11} y_{22} - c_2 x_{12} y_{21}}{\det(\mathbf{Y}_T)} = 1. \quad (26)$$

Этим выражением можно воспользоваться для определения c_1 и c_2 через их отношение $\frac{c_2}{c_1}$:

$$c_1 = \det(\mathbf{Y}_T) \left(x_{11} y_{22} - \frac{c_2}{c_1} x_{12} y_{21} \right)^{-1}, \quad (27)$$

$$c_2 = \det(\mathbf{Y}_T) \left(\frac{c_2}{c_1} x_{11} y_{22} - x_{12} y_{21} \right)^{-1}. \quad (28)$$

Подставляя эти выражения в (16), получаем \mathbf{T} .

Образуя произведения $\mathbf{S}_{m_r} = \mathbf{S}_{m_2} \mathbf{S}_{m_1}^{-1}$ и $\bar{\mathbf{S}}_{m_r} = \mathbf{S}_{m_3} \mathbf{S}_{m_1}^{-1}$, из (8) получим:

$$\mathbf{S}_{m_r} = e^{i(\phi_2 - \phi_1)} \mathbf{R} \mathbf{S}_{p_r} \mathbf{R}^{-1}, \quad (29)$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{m_r} = e^{i(\phi_3 - \phi_1)} \mathbf{R} \bar{\mathbf{S}}_{p_r} \mathbf{R}^{-1}, \quad (30)$$

где

$$\mathbf{S}_{p_T} = \mathbf{S}_{p_2} \mathbf{S}_{p_1}^{-1};$$

$$\bar{\mathbf{S}}_{p_T} = \mathbf{S}_{p_3} \mathbf{S}_{p_1}^{-1}.$$

Проводя для этих матричных соотношений выкладки, аналогичные проведенным выше для \mathbf{T} , получим

$$\mathbf{Y}_r = \mathbf{R} \mathbf{X}_r, \quad (31)$$

откуда

$$\mathbf{R} = \mathbf{Y}_r \Lambda_R \mathbf{X}_r^{-1}, \quad (32)$$

$$\mathbf{R} = \bar{\mathbf{Y}}_r \bar{\Lambda}_R \bar{\mathbf{X}}_r^{-1}, \quad (33)$$

где Λ_R и $\bar{\Lambda}_R$ – диагональные матрицы, элементы которых связаны соотношениями, аналогичными (20) – (23) и (27), (28), с той разницей, что в них x_{mn} заменяется на y_{mn} и наоборот. Таким образом, определяется матрица искажений при приеме \mathbf{R} .

При известных матрицах искажений \mathbf{R} и \mathbf{T} путем обратной подстановки в выражение (7) можно получить абсолютную величину $|r'_{vv} t'_{vv}|$. Приравнявая элементы матриц в обеих частях (7) и вычисляя модуль, можно найти элемент с индексом mn , а затем

$$|r'_{vv} t'_{vv}| = \frac{|(\mathbf{S}_{m_j})_{mn}|}{\left| \left(\mathbf{R} \mathbf{S}_{p_j} \mathbf{T} \right)_{mn} \right|}. \quad (34)$$

Таким образом, вычисляются все искомые значения, необходимые для восстановления истинного

значения \mathbf{S}_p по непосредственно наблюдаемой ПМП \mathbf{S}_m произвольной цели.

3. Результаты моделирования

Эффективность алгоритма проверялась имитационным математическим моделированием. При этом в качестве калибровочных целей были выбраны металлическая сфера (МС) и двугранный угловой отражатель (ДУО) с углом между гранями 90° . Для поляризационных искажений между антенно-волноводными трактами РЛС были приняты типовые значения [2]:

$$\left| \frac{\mathbf{r}_{hh}}{\mathbf{r}_{vv}} \right| = -0.10 \text{ дБ}, \quad \left| \frac{\mathbf{r}_{vh}}{\mathbf{r}_{vv}} \right| = -20.10 \text{ дБ},$$

$$\left| \frac{\mathbf{r}_{hv}}{\mathbf{r}_{hh}} \right| = -20.00 \text{ дБ}, \quad \left| \frac{\mathbf{t}_{hh}}{\mathbf{t}_{vv}} \right| = 0.10 \text{ дБ},$$

$$\left| \frac{\mathbf{t}_{vh}}{\mathbf{t}_{vv}} \right| = -20.00 \text{ дБ}, \quad \left| \frac{\mathbf{t}_{hv}}{\mathbf{t}_{hh}} \right| = -20.10 \text{ дБ}.$$

Моделирование проводилось в два этапа – для эталонных калибровочных отражателей (рис. 2, 3) и для отражателей с характеристиками, флуктуирующими относительно заданных значений (рис. 4, 5).

В случае эталонных отражателей алгоритм показывает хорошие результаты по компенсации уровня паразитной кроссполяризации – не хуже – 45 дБ.

Если же характеристики отражателей отклоняются от принимаемых к расчету, наблюдается существенное ухудшение результатов калибровки: – 30...20 дБ. Необходимо также отметить, что вид закона распределения флуктуаций сохраняется в полученных поправочных коэффициентах и может влиять на результаты последующей статистической обработки данных измерений.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что результаты калибровки в большей степени зависят от стабильности калибровочных целей и их погрешностей, чем от используемого алгоритма, при условии, что он

учитывает все подлежащие калибровке характеристики ПРЛС.

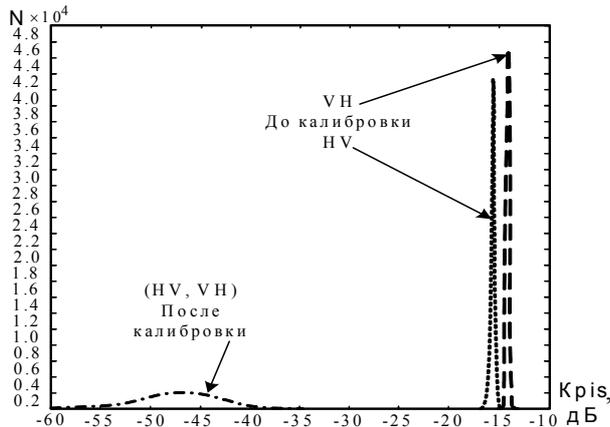


Рис. 2. ДУО, эталонные калибровочные цели

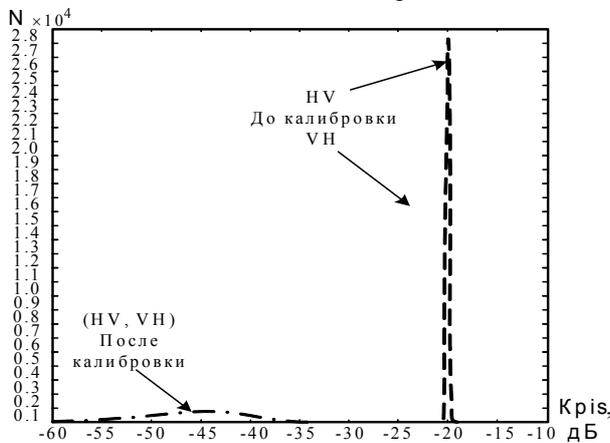


Рис. 3. МС, эталонные калибровочные цели

В связи с этим в качестве калибровочной цели предпочтительнее использование активного поляриметрического калибратора (АПК) [5], способного обеспечить необходимое отношение сигнал – шум, стабильность излучаемой мощности (как эквивалент ЭПР отражателей), а также гарантированное разделение оценки погрешности на передачу и прием для ПРЛС. Такой АПК должен также обеспечивать возможность одновременной передачи нескольких калибровочных ПМР для уменьшения количества необходимых измерений и повышения точности процедуры калибровки. Обеспечить эти требования возможно, если в АПК использовать сигналы с поляризационной модуляцией [6], однако для этого требуется разработка соответствующих методов калибровки и подбор оптимальных видов модуляции.

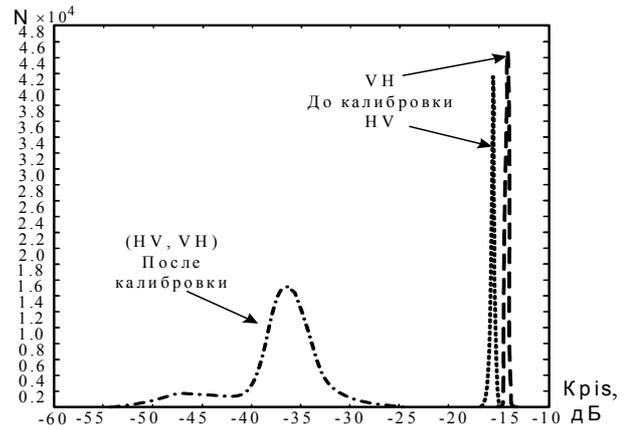


Рис. 4. ДУО, флуктуация калибровочных целей

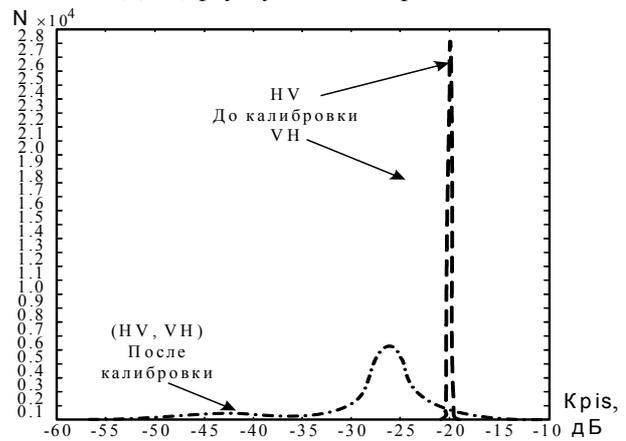


Рис. 5. МС, флуктуация калибровочных целей

Литература

1. Попов А.В. Об информативности инвариантных поляриметрических изображений // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2002. – Вып. 35. – С. 67-77.
2. Канарейкин Д.Б., Потехин В.А., Шишкин И.Ф. *Морская поляриметрия*. – Л.: Судостроение, 1968. – 328 с.
3. Марков Г.Т., Петров Б.М. *Электродинамика и распространение радиоволн*. – М.: Сов. радио, 1979. – 376 с.
4. Гантмахер Ф.Р. *Теория матриц*. – М.: Наука, 1967. – 730 с.
5. Barnes R.M. *Polarimetric calibration using in-scene reflectors*, MIT Lincoln Lab., Lexington, MA, Rep. TT-65, Sept., 1986.
6. Гусев К.Г., Филатов А.Д., Сополев А.П. *Поляризационная модуляция*. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.

Поступила в редакцию 12.12.03

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, ГНПЦ «Природа», г. Харьков