



УДК 621.396.67

И. Е. Макушкин, А. Е. Дорофеев, А. Н. Грибанов,
С. Е. Гаврилова, А. И. Синани

Метод измерения угловых ошибок пеленга в системе «антенна – обтекатель» в области сканирования луча ФАР

Представлен способ измерения угловых ошибок пеленга в системе антенна – обтекатель в двумерной угловой области сканирования антенны (фазированной антенной решетке, активной фазированной антенной решетке) с электронным управлением лучом. Измерения проводились на базе антенного измерительного коллиматорного комплекса («компактный полигон»). Приведены математические выражения, используемые при обработке полученных данных. Для создания матрицы угловых ошибок пеленга измерения осуществляются на различных углах крена системы антенна – обтекатель при отклонении луча фазированной антенной решетке в косых плоскостях. Для отработки методики на начальном этапе использовалась быстросъемная модель обтекателя, обладающая способностью вносить угловые ошибки пеленга.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, антенна с электронным управлением лучом, радиопрозрачный обтекатель, угловые ошибки пеленга.

Введение

Возникающие при наличии радиопрозрачного обтекателя (РПО) ошибки определения углового положения пеленга (угловые ошибки пеленга, УОП) [1] должны учитываться при работе бортовой радиолокационной станции (БРЛС) [2]. Работы по измерению УОП только в двух ортогональных плоскостях азимута или угла места проводятся довольно часто [3, 4]. При этом УОП определяется как разность между измеренными координатами нулей соответствующей разностной диаграммы направленности (ДН) до и после установки обтекателя (метод разности). Такой подход дает представление только об одной из компонент УОП. Произвольно отклоненный луч фазированной антенной решетки (ФАР) в системе антенна – обтекатель приобретает угловые ошибки пеленга сразу по обеим координатам (рис. 1) [1]. Поэтому разработка методов практической оценки влияния обтекателя на уходы «нулей» пеленгационных характеристик во всей области сканирования луча является сегодня актуальной задачей.

Геометрия задачи для одного сечения поверхности РПО

На рис. 2 представлена ФАР (поз. 1), центр апертуры (поз. 2) которой связан одновременно

со сферической (θ, Ψ) и декартовой (X, Y, Z) системами координат. До установки РПО (поз. 10) опорно-поворотное устройство антенны (ОПУА) устанавливается на произвольный угол крена Ψ_{j-} (поз. 5). При произвольно выбранном пространственном угле отклонения θ_{i-} (поз. 7) от нормали к раскрытию антенны (поз. 8) управляющие углы L_x и L_y (поз. 3 и 4) между соответствующими осями X, Y и направлением установки луча (поз. 6), рассчитываются по формулам

$$\cos L_x = \sin \theta_i \cos \Psi_j; \quad (1)$$

$$\cos L_y = \sin \theta_i \sin \Psi_j, \quad (2)$$

а углы фазирования решетки, пересылаемые в блок управления лучом ФАР $(\alpha_x; \alpha_y)$ из вычислителя БРЛС, по формулам

$$\alpha_x = 90 - L_x; \quad (3)$$

$$\alpha_y = 90 - L_y. \quad (4)$$

При таком расчете углов фазирования α_x, α_y и неизменном угле крена системы Ψ_j любой выбранный из возможного для данной ФАР угол отклонения луча от нормали θ_i будет устанавливать луч в плоскость (поз. 12), совпадающую с плоскостью азимутального поворота ОПУА (поз. 14). Если при этом азимутальная платформа ОПУА с тестируемой ФАР развернута на угол $(-\theta_i)$, то нормаль к плоскому падающему на раскрыт ФАР фронту электромагнитной волны в дальней зоне

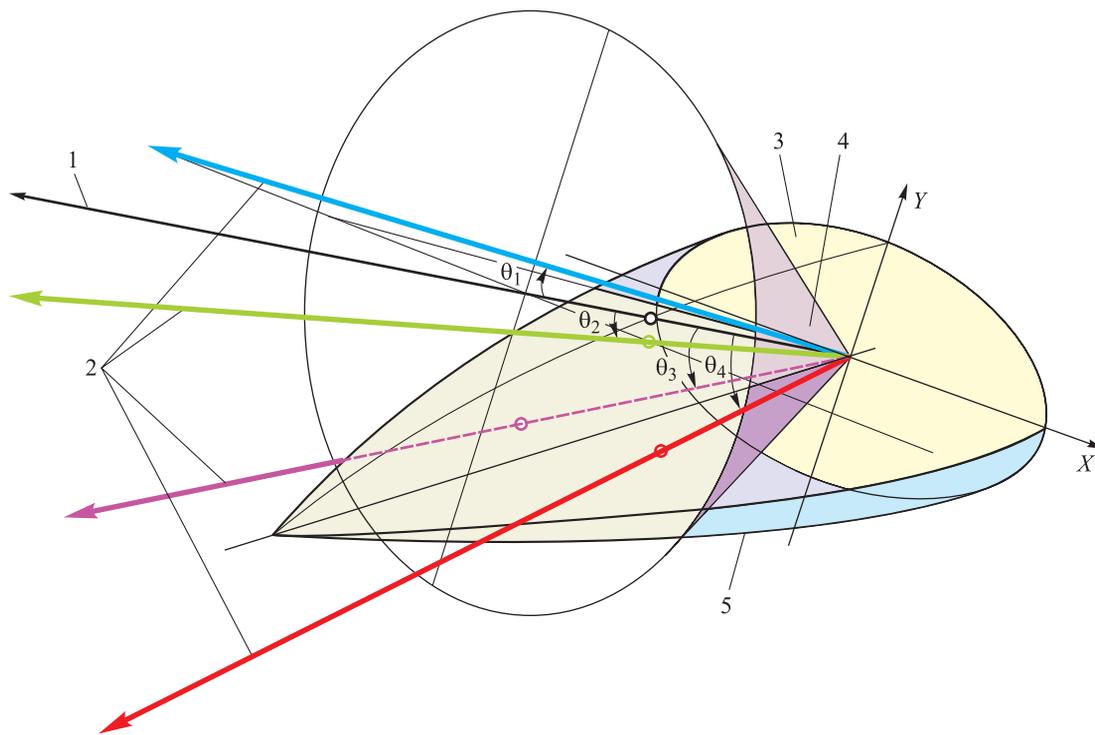


Рис. 1. Произвольно отклоненные лучи фазированной антенной решетки (ФАР) в системе антенна – обтекатель: 1 – нормаль к апертуре; 2 – возможные положения установки луча ФАР; 3 – апертура ФАР; 4 – конус сканирования ФАР; 5 – поверхность РПО

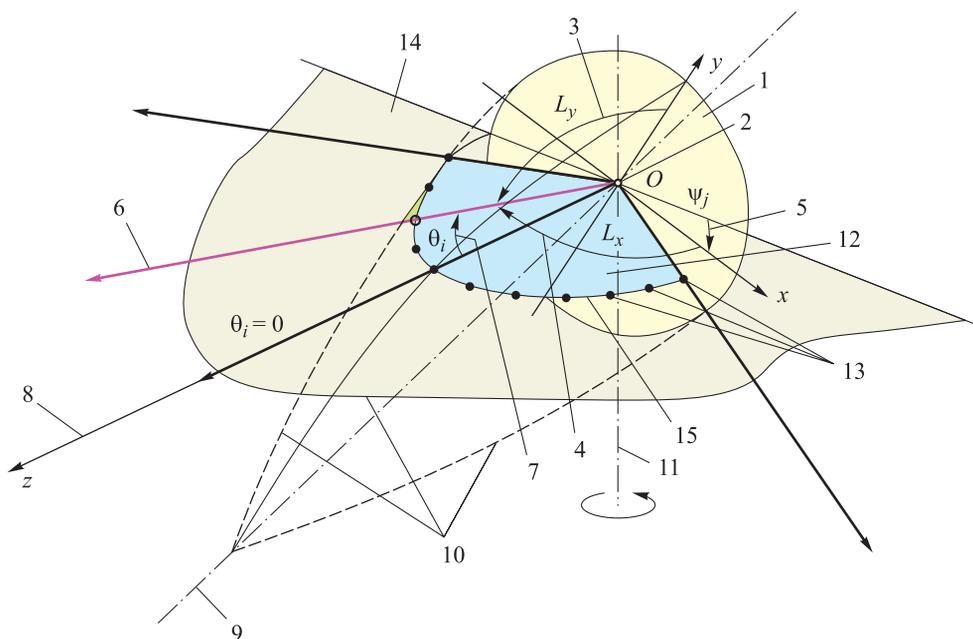


Рис. 2. Геометрическое представление задачи по определению компонент УОП:

1 – ФАР; 2 – центр апертуры ФАР; 3, 4 – управляющие углы L_x и L_y ; 5 – Ψ_j произвольный угол крена ФАР; 6 – произвольное направление установки луча ФАР; 7 – угол θ_i между нормалью к раскрытию и направлением установки луча ФАР; 8 – нормаль к раскрытию ФАР (луч, установленный по нормали, имеет $\theta_i = 0$); 9, 10 – ось и образующие поверхности РПО; 11 – азимутальная ось вращения ФАР, установленной на ОПУА; 12 – плоскость установки луча ФАР; 13 – дискретные точки установки луча ФАР; 14 – плоскость азимутального поворота ОПУА; 15 – линия сечения на поверхности РПО, по которой проводится измерение компонент УОП

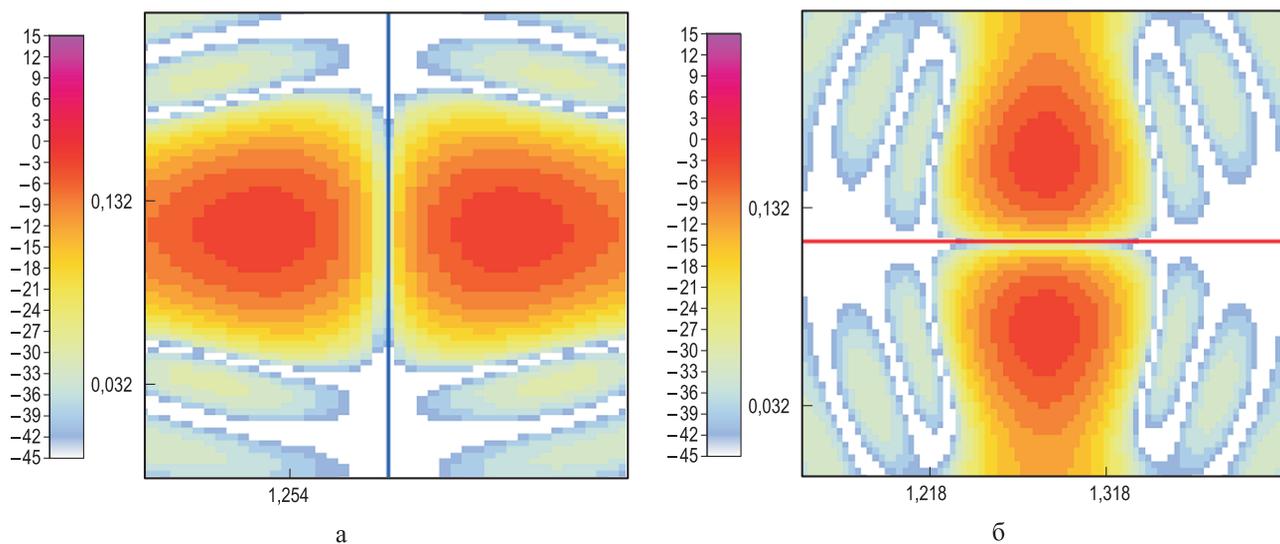


Рис. 3. Пространственная разностная азимутальная (а) и угломестная (б) ДН на плоскости (u, v)

(в данном случае в рабочей зоне коллиматора) совпадает с направлением установки луча. При наличии у тестируемой ФАР выходов обоих разностных каналов (Аз и Ум) путем незначительного поворота ОПУА по оси его азимута (поз. 11) в области угла $(-\theta_i)$ одновременно могут быть измерены координаты минимумов сечений обеих разностных диаграмм.

Математический аппарат вычисления угловых ошибок пеленга

Известно, что линии нулевых уровней пространственных ДН разностных каналов плоских ФАР отображаются в системе координат направляющих (управляющих) косинусов (u, v) прямыми линиями вдоль осей u или v . На рис. 3 представлены пространственные ДН разностных каналов.

На рис. 4 картографическими линиями сечений схематично изображены пространственные разностные ДН (Аз – зеленые линии сечений, Ум – красные) в системе координат направляющих (управляющих) косинусов $U = \cos L_x, V = \cos L_y$. L_x и L_y – определенные ранее управляющие углы для ФАР, установленной на угол крена Ψ . Тогда в системе координат направляющих косинусов возможная область отстроек луча ФАР будет ограничена единичной окружностью, а координаты его установки на этой плоскости будут полностью определены углом отклонения луча ФАР от нормали к раскрытию θ_o и углом установки ФАР по крену Ψ . На плоскости (U, V) можно выделить две характерные точки.

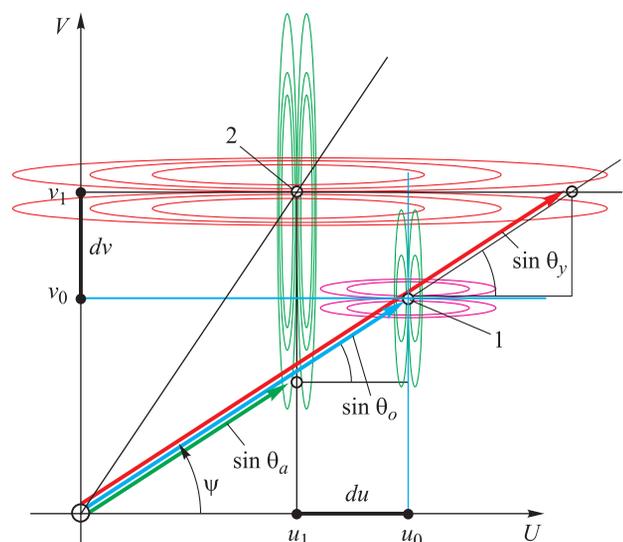


Рис. 4. Линии сечений пространственных разностных ДН (Аз – зеленые линии сечений, Ум – красные линии сечений) в системе координат направляющих (управляющих) косинусов $U = \cos L_x, V = \cos L_y$ для ФАР, установленной на угол крена Ψ

В точке 1 до установки РПО луч ФАР, согласно формулам (1)–(4), устанавливается по сферическим координатам θ_o, Ψ и соответствует точному пеленгу на направление прихода плоского фронта электромагнитной волны от «цели» (в данном случае от коллиматора измерительного комплекса). На плоскости управляющих косинусов это точка с координатами (u_o, v_o) . При этом пересечение линий нулевых уровней пространственных разностных ДН, формируемых тестируемой ФАР, происходит в точке 1. Это означает совпадение координат минимумов одновременно измеряемых

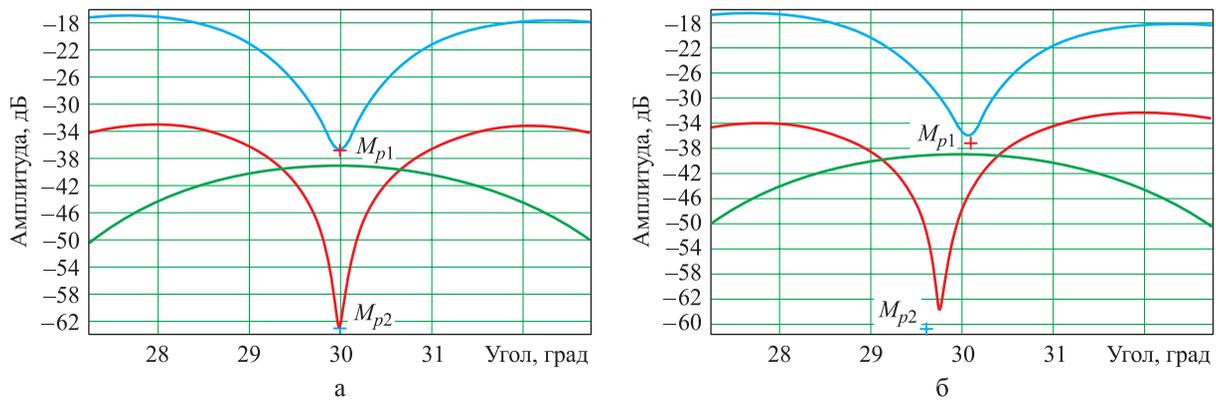


Рис. 5. Снимки экрана монитора измерительного комплекса при точно установленном пеленге на источник сигнала (а) и отсутствии такового (б)

по каналам Аз и Ум сечений разностных ДН (рис. 5, а), при которых $\theta_a = \theta_y$ и совпадают с углом отклонения луча θ_o .

В точке 2 после установки РПО луч ФАР по прежнему установлен по сферическим координатам θ_o, Ψ на направление прихода плоского фронта электромагнитной волны от цели. Однако из-за преломления в РПО теперь направление прихода плоского фронта электромагнитной волны уже не соответствует первоначально установленному пеленгу. Таким образом, точка 2 (как одна из возможных точек) с координатами (u_1, v_1) соответствует изменившемуся направлению пеленга, вызванному установкой РПО. Пересечение линий нулевых уровней пространственных разностных ДН, формируемых тестируемой системой ФАР – РПО, происходит в точке 2. Поскольку система ФАР – РПО по-прежнему сфазирована по координатам θ_o, Ψ , то фактически измеряемые минимумы сечений обеих пространственных разностных ДН и определяемые концом вектора $\sin\theta_a$ и $\sin\theta_y$ будут зафиксированы на углах θ_a и θ_y соответственно. При этом фиксируемые углы измеренных минимумов θ_a и θ_y не равны и не совпадают с θ_o (рис. 5, б).

На плоскости направляющих косинусов координаты точки 1 – $u_0 = \cos L_x, v_0 = \cos L_y$, а в переменных сферической системы координат выражаются приводимыми ранее формулами (1) и (2). Измерив методом механического азимутального сканирования ОПУА в окрестности точки $(-\theta_o)$ изменившиеся после установки РПО углы θ_a и θ_y (угол начальной установки θ_o и Ψ известны) и учитывая, что

$$u_1 = u_0 + du; \tag{5}$$

$$du = (\sin\theta_o - \sin\theta_a)\cos\Psi; \tag{6}$$

$$v_1 = v_0 + dv; \tag{7}$$

$$dv = (\sin\theta_y - \sin\theta_o)\sin\Psi, \tag{8}$$

по формулам (6), (8) рассчитываем du, dv , а по (5), (7) – u_1, v_1 .

Принимая во внимание, что

$$L_{x0} = \arccos u_0; \tag{9}$$

$$L_{x1} = \arccos u_1; \tag{10}$$

$$L_{y0} = \arccos v_0; \tag{11}$$

$$L_{y1} = \arccos v_1, \tag{12}$$

из соотношений (3) и (4) определяем приращение компоненты $\Delta\alpha_x$ к углу начального фазирования тестируемой ФАР по координате α_x , вызванное установкой на ФАР РПО, как

$$\Delta\alpha_x = L_{x1} - L_{x0}. \tag{13}$$

А приращение компоненты $\Delta\alpha_y$ к углу начального фазирования тестируемой ФАР по координате α_y , вызванное установкой на ФАР РПО, как

$$\Delta\alpha_y = L_{y1} - L_{y0}. \tag{14}$$

Фактически $\Delta\alpha_x$ и $\Delta\alpha_y$ и есть искомые ошибки пеленга для одного элемента матрицы УОП, рассчитанные для положения установки луча ФАР с пространственными сферическими координатами (θ_o, Ψ) , что соответствует координатам фазирования решетки α_x и α_y . Эти данные передаются из вычислителя БРЛС в блок управления лучом ФАР при каждой перестройке луча.



Проводя с (1)–(14) необходимые подстановки и дальнейшие преобразования, можно получить более общий вид выражений для $\Delta\alpha_x, \Delta\alpha_y$ как функцию от произвольных (допустимых для тестируемой ФАР) сферических координат установки системы θ_{oi}, Ψ_j .

В этом случае сами компоненты $\Delta\alpha_{xi,j}, \Delta\alpha_{yi,j}$ пеленгационной ошибки, вносимые РПО, при углах установки системы антенна – обтекатель $\theta_o = \theta_{oi}, \Psi = \Psi_j$ в переменных сферической системы координат антенны могут быть рассчитаны по формулам

$$\Delta\alpha_{xi,j} = \arccos[\sin\theta_{oi} \cos\Psi_j + (\sin\theta_{ai} - \sin\theta_{oi}) \cos\Psi_j] - \arccos[\sin\theta_{oi} \cos\Psi_j]; \quad (15)$$

$$\Delta\alpha_{yi,j} = \arccos[\sin\theta_{oi} \sin\Psi_j + (\sin\theta_{yi} - \sin\theta_{oi}) \sin\Psi_j] - \arccos[\sin\theta_{oi} \sin\Psi_j], \quad (16)$$

где $\Delta\alpha_{xi,j}$ – составляющая пеленгационной ошибки, вносимой обтекателем, по углу α_x (при $\theta = \theta_{oi}, \Psi = \Psi_j$);

θ_{ai} – измеренный фактический угол минимума сечения разностной пространственной азимутальной диаграммы (при $\theta = \theta_{oi}, \Psi = \Psi_j$) после установки обтекателя;

Ψ_j – текущее значение угла крена антенной системы относительно горизонтальной плоскости азимутального сканирования ОПУА;

θ_{oi} – текущее значение угла θ_o в сферической системе координат ФАР между нормалью к раскрытию ФАР и направлением на минимум, формируемый пространственными разностными ДН, до установки обтекателя, при котором измеряемые минимумы в сечениях разностных ДН совпадают;

$\Delta\alpha_{yi,j}$ – составляющая пеленгационной ошибки, вносимой обтекателем, по углу α_y (при $\theta = \theta_{oi}; \Psi = \Psi_j$);

θ_{yi} – измеренный фактический угол минимума сечения разностной пространственной угломестной диаграммы (при $\theta = \theta_{oi}; \Psi = \Psi_j$) после установки обтекателя.

Следует еще раз подчеркнуть, что речь идет о вычисляемых ошибках в системе коор-

динат углов фазирования ФАР (α_x, α_y). Хотя полученные ошибки могут быть пересчитаны и в другие системы координат, например носителя, для их последующей компенсации в каналах пеленга БРЛС этот вид их выражения представляется наиболее удачным.

Если предположить, что начальная установка ФАР на ОПУА такова, что имеет место совпадение плоскостей установки луча (поз. 12, см. рис. 2) плоскости азимутального поворота ОПУА (поз. 14) с горизонтальной, то в точках (поз. 13) происходит пересечение линий минимальных уровней пространственных разностных диаграмм, формируемых ФАР (т. е. выполняется условие $\theta_{ai} = \theta_{yi}$). На снимке экрана монитора измерительного комплекса (см. рис. 5, а) это выглядит как совпадение координат минимумов измеряемых сечений обеих разностных ДН. После установки РПО на антенну на тех же углах измеряются новые (рис. 5, б), изменившиеся координаты минимумов сечений разностных ДН θ_{ai} и θ_{yi} . В этом случае предложенная математическая модель работает, а по величинам и знакам отклонений θ_{ai} и θ_{yi} от изначального θ_{oi} , где имело место выполнение условия $\theta_{ai} = \theta_{yi}$, по формулам (15)–(16) определяют компоненты пеленгационной ошибки $\Delta\alpha_{xi,j}$ и $\Delta\alpha_{yi,j}$. Это означает, что в точках (поз. 13) они могут быть рассчитаны. При этом линии сечения (поз. 15) поверхности РПО плоскостью установки луча ФАР (поз. 12), на которой лежат эти точки, определит одну из строк общей матрицы УОП.

Геометрия задачи для набора сечений по всей поверхности РПО

В дальнейшем подобные измерения могут быть проведены по всей поверхности РПО, т. е. при всех возможных дискретных установках системы ФАР – РПО по углам крена Ψ_j и углам отклонения луча θ_{oi} . Тем самым могут быть получены набор строк и, соответственно, матрица компонент УОП для РПО произвольной формы. Так, например, в рассматриваемом случае (см. рис. 2) ось РПО (поз. 9) не совпадает с нормалью к раскрытию ФАР (поз. 7). На рис. 6 изображена сложная поверхность произвольного РПО, попадающая в область сканирования луча ФАР. Линии сечений его поверхности и точки на них, по которым про-

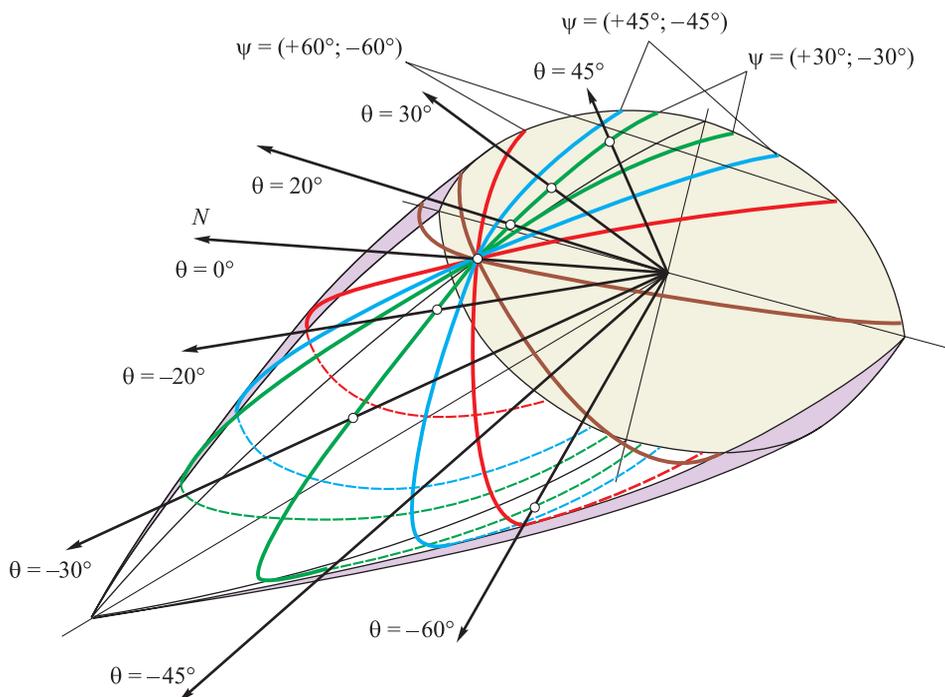


Рис. 6. Линии сечений поверхности РПО произвольной формы и точки на них, по которым проводятся измерения компонент УОП

водятся измерения ($\Delta\alpha_{xi,j}$ и $\Delta\alpha_{yi,j}$) компонент УОП, показаны разными цветами (см. рис. 6).

Принцип электронной компенсации положения начальной установки луча ФАР при измерении УОП

Ранее говорилось, что для дальнейших корректных измерений УОП, вносимых РПО, до его установки должен быть взят точный пеленг тестируемой ФАР на плоский фронт проходящей электромагнитной волны. Только в этом случае измеренные минимумы сечений пространственных разностных ДН совпадают и можно вести расчеты по предлагаемой методике. Причем условие это должно выполняться в любой доступной к измерению по данной методике точке, т. е. при любых возможных $\theta_o = \theta_{oi}$, $\Psi = \Psi_j$.

На рис. 7 схематично изображено ОПУА, подобное тому, которое применялось в измерениях. Представлены два простейших случая, когда из-за ошибок начальной установки ФАР по крену ($\Delta\psi$) или по углу отклонения ($\Delta\theta$) плоскость азимутального поворота не совпадает с плоскостью истинного горизонта.

В самом общем случае реальная плоскость азимутального поворота ОПУА на рис. 7 и жестко связанной с ней ФАР может занимать

еще более сложное произвольное пространственное положение. При этом рассчитанные по формулам (3), (4) угловые координаты $\alpha_{xi,j}$ и $\alpha_{yi,j}$, по которым фазуется решетка, не устанавливают ее луч точно по пеленгу на плоский фронт проходящей электромагнитной волны от цели (коллиматора). Условие $\theta_a = \theta_y$ в таких точках не выполняется, и это означает, что если в дальнейшем УОП рассчитывать относительно этих координат, ошибка будет недопустимой.

В отдельных исключительных случаях изначальной механической юстировкой ОПУА комплекса с установленной на нем ФАР в какой-то из точек установки системы можно привести реальную плоскость азимутального поворота к условной плоскости «истинного» горизонта. Этого можно добиться, например, регулируя опоры станины ОПУА (поз. 2 на рис. 7). Но опыт практических измерений и их громадный потенциальный объем показывают, что это абсолютно бесперспективный путь. Добиться правильной начальной установки при любых возможных $\theta_o = \theta_{oi}$, $\Psi = \Psi_j$ физически не представляется возможным. Именно по этой причине для практической реализации предлагаемого метода измерения УОП в основу его положен принцип электронной ком-

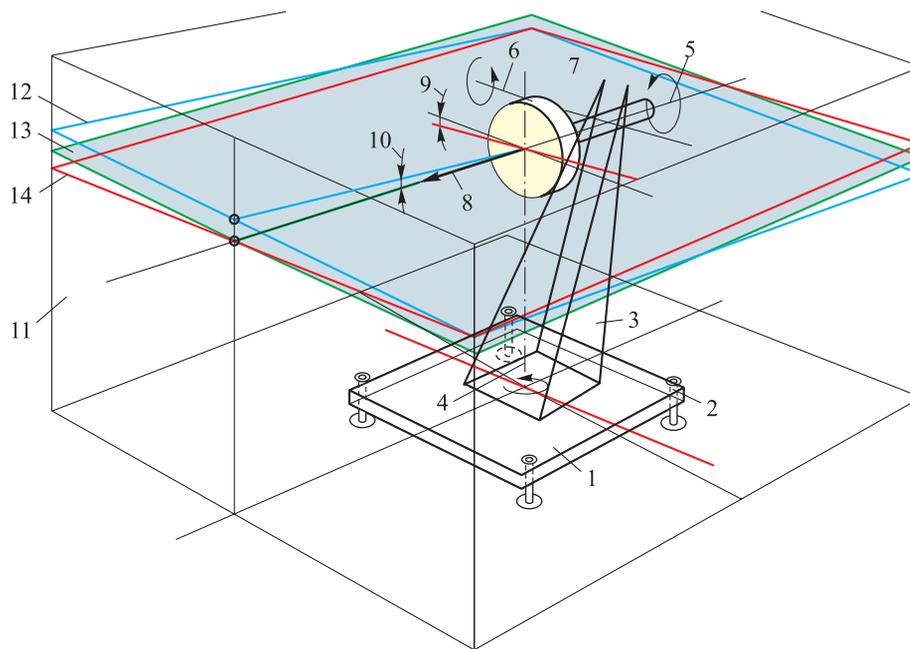


Рис. 7. Схематическое изображение ОПУА, применяемое в измерениях:

1 – горизонтальная (юстируемая) платформа ОПУА; 2 – регулируемая подъемная опора горизонтальной платформы ОПУА; 3 – азимутальная поворотная платформа ОПУА с элементами конструкции вертикальных опор; 4 – ось азимутального поворота; 5 – ось поворота тестируемой ФАР по крену; 6 – ось поворота тестируемой ФАР в угломестной плоскости; 7 – плоскость раскрыва тестируемой ФАР; 8 – нормаль к плоскости раскрыва тестируемой ФАР; 9 – рассогласования по углу крена $\Delta\psi$; 10 – рассогласования по углу отклонения луча $\Delta\theta$; 11 – условные вертикальные плоскости, равноудаленные от фазового центра тестируемой ФАР; 12 – условная плоскость азимутального поворота ОПУА с тестируемой ФАР для случая $\Delta\psi = 0, \Delta\theta \neq 0$ (синяя линия); 13 – условная истинная горизонтальная плоскость (выделена зеленым контуром); 14 – условная плоскость азимутального поворота ОПУА с тестируемой ФАР для случая $\Delta\psi \neq 0, \Delta\theta = 0$ (красная линия)

пенсации начальной установки луча ФАР при измерении УОП (до установки РПО).

Для компенсации ошибок начальной установки луча ФАР по пеленгу на плоский фронт падающей электромагнитной волны предложен вычислительный способ. Суть его заключается в первоначальной компенсации ошибки установки луча ФАР, сфазированной по координатам $\theta_o = \theta_{oi}, \Psi = \Psi_j$ с помощью самой ФАР. Для этого точно так же, как в самом описываемом методе измерения УОП, предлагается измерять начальное разбегание θ_a и θ_y и по формулам (15), (16) рассчитать добавки $\Delta\alpha_{xi,j\text{комп}}$ и $\Delta\alpha_{yi,j\text{комп}}$ с той лишь разницей, что, взятые с соответствующим знаком и добавленные к изначальным координатам фазирования $\alpha_{xi,j\text{нач}}$ и $\alpha_{yi,j\text{нач}}$ (при углах установки луча $\theta_o = \theta_{oi}, \Psi = \Psi_j$), они будут играть роль компенсирующих и должны приводить систему в точку, где условие $\theta_a = \theta_y$ уже выполняется. Если подобная процедура компен-

сации будет проведена по всем точкам массива, предполагаемого в дальнейшем к измерениям УОП, то можно сказать, что после установки РПО и проведения измерений УОП по точкам, где компенсация проведена, рассчитываемые $\Delta\alpha_{xi,j}$ и $\Delta\alpha_{yi,j}$ действительно есть ошибки пеленга, вносимые непосредственно РПО. По этой причине в дальнейшем данный метод определения компонент УОП будет называться методом компенсации. На рис. 8 приведены данные практических измерений θ_a и θ_y (до установки РПО) по сигналам двух разностных каналов при первоначальной установке тестируемой ФАР по крену $\Psi = 60^\circ$ и угле отклонения луча от нормали $\theta_o = 45^\circ$. На рис. 8, а видно «разбегание» координат нулей измеряемых разностных диаграмм, на рис. 8, б – результат проведенной компенсации.

Для всех дальнейших измерений УОП (после установки РПО) за точку начальной установки следует брать новую точку с уче-

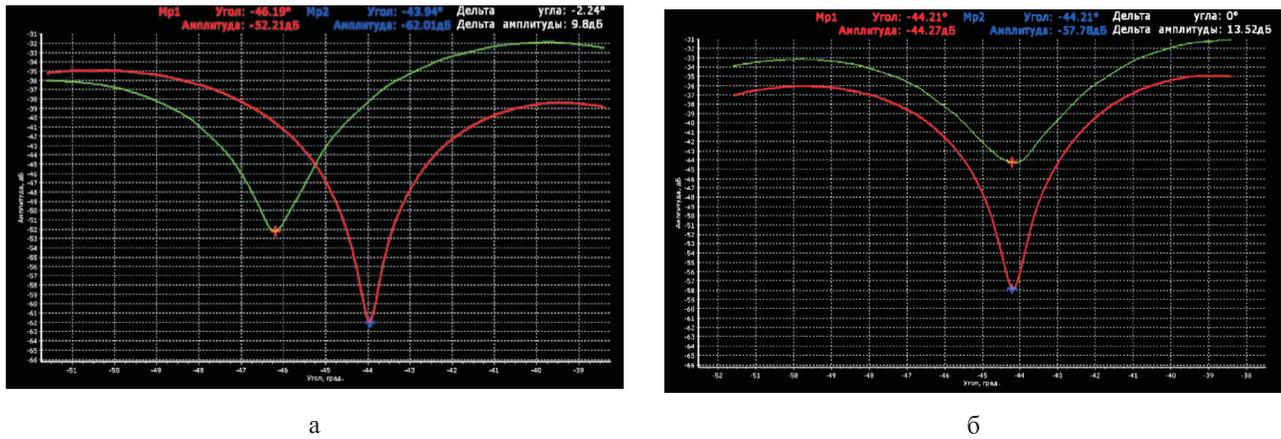


Рис. 8. Данные практических измерений θ_a и θ_y (до установки РПО) по сигналам двух разностных каналов при первоначальной установке тестируемой ФАР по крену $\Psi = 60^\circ$ и угле отклонения луча от нормали $\theta_0 = 45^\circ$ до (а) и после (б) компенсации

том компенсирующей добавки $\Delta\alpha_{xi,j,комп}$ и $\Delta\alpha_{yi,j,комп}$.

Измерительный комплекс АКК1-12.

Оборудование комплекса.

Автоматизация измерений с помощью ПО Stend BEK

На рис. 9 представлена блок-схема антенно-коллиматорного комплекса (АКК1-12), на базе которого и проводились измерения.

Значительные массивы измеряемых и обрабатываемых по предлагаемой методике данных потребовали создания специальной программы. Программное обеспечение (ПО) *Stend*

BEK было создано и опробовано на комплексе. Интерфейс ПО *Stend BEK* показан на рис. 10.

Помимо обычного измерения ДН, при использовании одновременно трех каналов тестируемой ФАР (суммарного, азимутального и угломестного разностных) она позволяет вычислять УОП, возникающие в системе ФАР – РПО, по предлагаемой методике. На начальном этапе, до установки РПО, на каждом из выбранных сечений по углу крена Ψ_j и по сформированному файлу заданий для θ_{oi} одновременно измеряются минимумы сечений обеих разностных ДН и по координатам начального

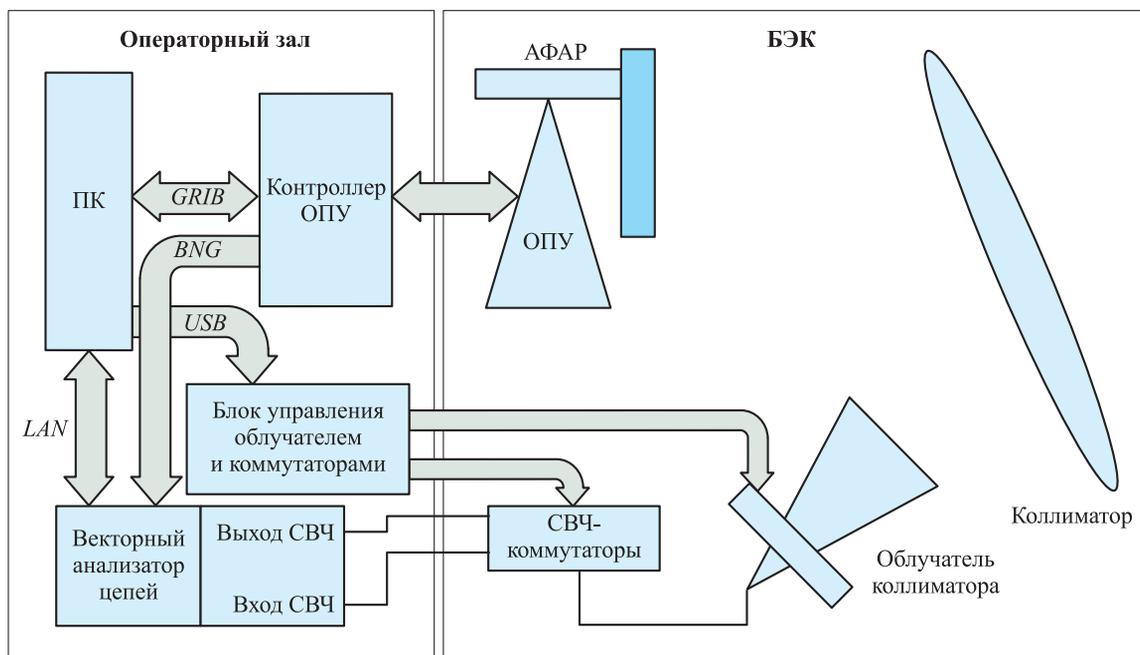


Рис. 9. Блок-схема антенно-коллиматорного комплекса (АКК1-12)

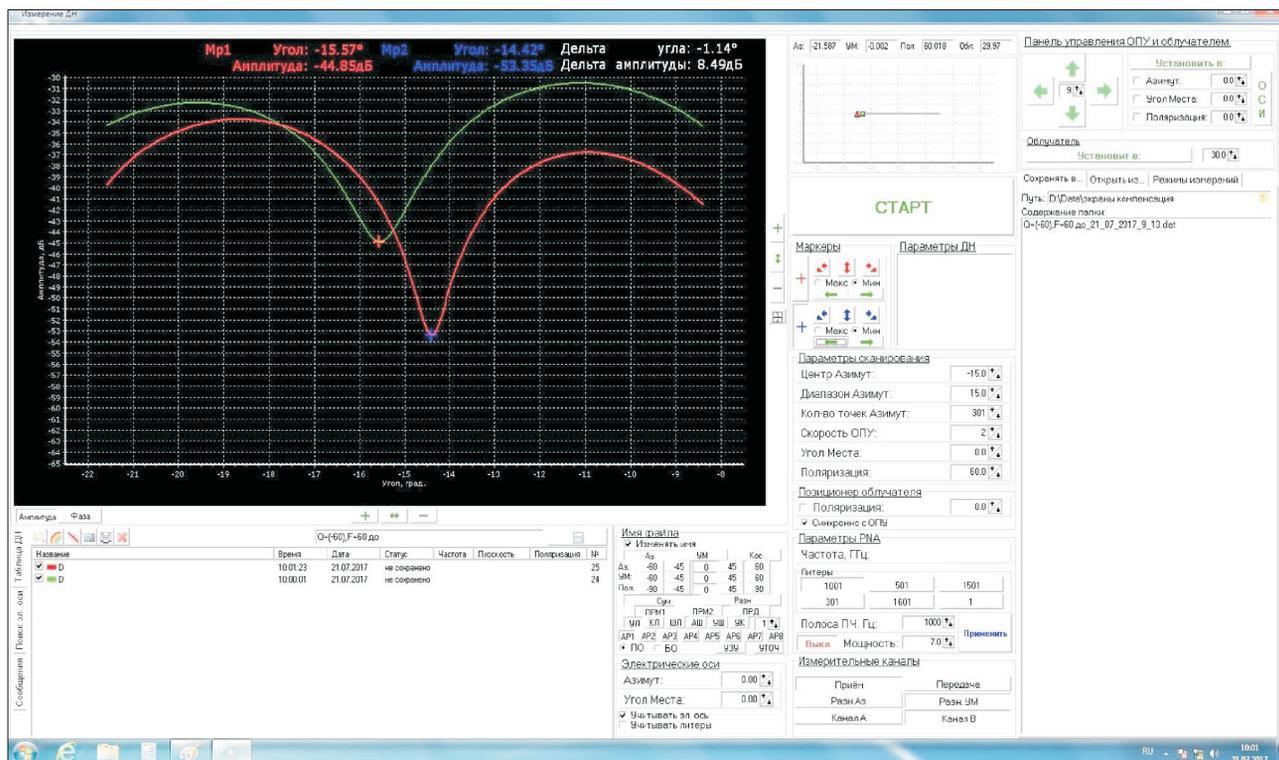


Рис. 10. Интерфейс программы Stend BEK

«разбегания» θ_a и θ_y вычисляются компенсирующие добавки в каждой точке начального фазирования ФАР ($\Delta\alpha_{xi,j\text{ комп}}$ и $\Delta\alpha_{yi,j\text{ комп}}$) из файла заданий. Затем измерения повторяются по этим же точкам, но с уже установленным РПО. Теперь с учетом найденных компенсирующих добавок в системе координат углов фазирования $\alpha_{xi,j}$ и $\alpha_{yi,j}$ рассчитываются компоненты УОП ($\Delta\alpha_{xi,j}$ и $\Delta\alpha_{yi,j}$), вносимые непосредственно самим РПО. На основе данных измерений в дальнейшем формируется полная матрица УОП. Кроме того, поскольку в процессе измерения и вычисления УОП измеряется еще и суммарная ДН (до и после установки РПО), то не составляет труда вычислить и коэффициент прохождения (КП) РПО по тем же точкам, где проводится измерение УОП. И хотя такая задача не ставилась, на основе этих данных может быть легко сформирована полная матрица КП по всей поверхности РПО.

Оценка ошибок измерения

Прежде чем перейти к обсуждению практических измерений, следует рассмотреть возникающие ошибки, присущие как измерительному комплексу, на котором они проводились, так и предлагаемой методике их проведения.

Они могут быть разделены на систематические и случайные.

Систематические ошибки и возможности их компенсации. По большей части погрешность, которую компенсируют способом, описанным выше, можно отнести к систематической, т. е. определяемой механическим несопадением плоскости перемещения тестируемой ФАР и гипотетической плоскостью измерений (плоскость «истинного» горизонта). Однако даже если начальная компенсация была корректно проведена по всем предполагаемым к измерениям точкам (т. е. для всех возможных θ_{oi} , Ψ_j) при отсутствии РПО на тестируемой ФАР, то при последующей его установке возникает другая опасность. Если плоскости сканирования тестируемой ФАР без РПО и с РПО совпадают полностью, т. е. установка дополнительного веса на ОПУА не меняет пространственное положение ФАР с РПО по отношению к положениям ФАР до его установки для всех возможных θ_{oi} , Ψ_j , то дополнительной погрешности не возникает. Но практические измерения показывают, что это не так. Навеска на тестируемую ФАР РПО даже достаточно легкого (порядка 12 кг)

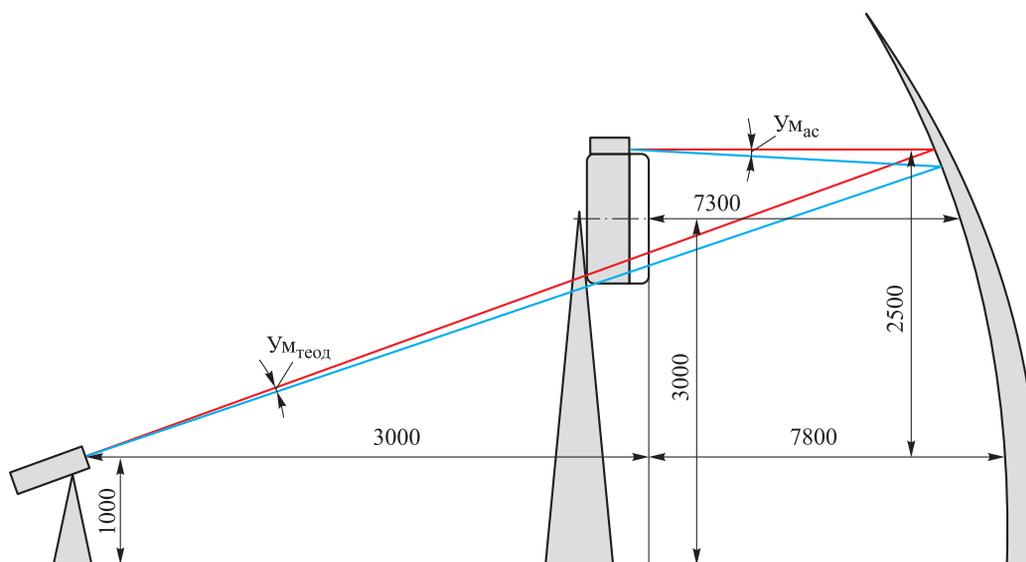


Рис. 11. Способ компенсации ошибок, вносимых механической системой ОПУА в приводе угломестного канала при $\Delta\gamma_{\text{теод}} = 3$ угл. мин, $\Delta\gamma_{\text{Мас}} = 4,12$ угл. мин

макета-имитатора, речь о котором пойдет далее, приводит к уходу ее пространственного положения относительно начального. Если при этом не возвращать систему в изначальную реперную точку привязки, то к измеренным реальным компонентам УОП, связанным исключительно с преломлением волнового фронта обтекателем, добавятся неучтенные компоненты обеих ошибок, относящихся к изменению пространственного положения системы. После этого разделить вклады в значение измеренных компонент УОП от одного и другого факторов невозможно. На рис. 11 показано, какие доступные меры по предотвращению ошибок, вносимых механической системой ОПУА (главным образом в приводе угломестного канала), были приняты.

Лазерный датчик-указатель, закрепленный до установки на тестируемую ФАР РПО с помощью жесткого кронштейна, дает на поверхности коллиматора (считаем его неподвижным объектом) световое пятно. На него наводится прицельное перекрестие оптической трубы теодолита. По отсчетной шкале прибора фиксируются азимут и угол места пятна от лазерного указателя (следовательно, и самой тестируемой ФАР) в системе координат теодолита. Подобная процедура проводится для всех углов крена Ψ_j , на которых предполагается измерять УОП. Угол азимутального поворота, на котором происходит подобная привязка

ОПУА, в данном случае был один и тот же – $\theta_{oi} = 0$ (точнее, азимутальный угол найденной электрической оси при угле крена Ψ_j). После установки РПО за счет механического провисания угломестного привода ОПУА (возможно из-за механических люфтов) вместе с установленной на нем ФАР пятно от лазерного указателя смещается. Для приведения системы ФАР – РПО в точку начала координат электромеханическим угломестным приводом ОПУА по координатной отсчетной шкале теодолита осуществляют возврат системы в точку начальной привязки. Подобная процедура привязки (по заготовленной до установки РПО таблице) выполнялась для всех возможных углов крена системы – Ψ_j . Для худшего случая точность компенсации электромеханическим приводом ОПУА в системе координат теодолита составляла 3 угловые минуты. На рис. 11 показано, что с учетом взаимного расположения позиций ОПУА, зеркала коллиматора, тестируемой ФАР и теодолита при пересчете в систему координат антенны, точность составит порядка 4,2 угловой минуты.

К сожалению, компенсация механического «провисания» угломестного привода по неподвижной привязке (коллиматору) проводилась только на нулевых углах азимутального поворота ОПУА, и какова будет максимальная ошибка измерения компонент УОП, связанная с несовпадением плоскостей при



других углах азимутального поворота ОПУА θ_{oi} , сложно предположить. Контроль позиций объекта (ФАР – РПО) во всем диапазоне углов установки θ_{oi} , Ψ_j возможен, хотя и потребовал бы существенно большего количества дополнительных датчиков положения. В рассматриваемом случае не было ни временных, ни материальных ресурсов для дальнейшего углубленного продолжения данных работ.

Случайные ошибки. Прежде всего к ним можно отнести среднеквадратичную ошибку фазирования решетки определенного размера с заданным количеством фазоуправляемых элементов в раскрыве и известным числом двоичных разрядов управления фазовращателем. По этой причине в рамках предложенного метода и ошибка начальной компенсации, и ошибка, с которой проводится последующий расчет компонент $(\Delta\alpha_{xi,j}, \Delta\alpha_{yi,j})$, являются также случайными. После измерений расчет компонент УОП, вносимых РПО, осуществляется по формулам (15), (16), которые в некоторых случаях, могут быть упрощены до выражений:

$$\Delta\alpha_{xi,j} = \arcsin(\sin\theta_{oi} \cos\Psi_j) - \arcsin(\sin\theta_{oi} \cos\Psi_j); \quad (17)$$

$$\Delta\alpha_{yi,j} = \arcsin(\sin\theta_{oi} \sin\Psi_j) - \arcsin(\sin\theta_{oi} \sin\Psi_j), \quad (18)$$

где $\Delta\alpha_{xi,j}$ – составляющая пеленгационной ошибки, вносимой обтекателью, по углу α_x (при $\theta = \theta_{oi}$; $\Psi = \Psi_j$);

Ψ_j – текущее значение угла крена антенной системы относительно горизонтальной плоскости азимутального сканирования ОПУА;

θ_{oi} – текущее значение угла θ_o в сферической системе координат ФАР между нормалью к раскрыву ФАР и направлением на минимум, формируемый пространственными разностными ДН, до установки обтекателя, при котором измеряемые минимумы в сечениях разностных ДН совпадают;

$\Delta\alpha_{yi,j}$ – составляющая пеленгационной ошибки, вносимой обтекателью, по углу α_y (при $\theta = \theta_{oi}$; $\Psi = \Psi_j$);

θ_{oi} – измеренный, фактический угол минимума сечения разностной пространственной азимутальной диаграммы (при $\theta = \theta_{oi}$; $\Psi = \Psi_j$) после установки обтекателя;

θ_{yi} – измеренный, фактический угол минимума сечения разностной пространственной угломестной диаграммы (при $\theta = \theta_{oi}$; $\Psi = \Psi_j$) после установки обтекателя.

Следует еще раз подчеркнуть, что речь идет о вычисляемых ошибках в системе координат углов фазирования ФАР (α_x ; α_y). По известным из математики (метрологии) соотношениям погрешность величины, представляющей из себя сложную функцию (многих переменных), определяется путем вычисления ее дифференциала через дифференциалы ее аргументов. В данном случае аргументами были бы: $\Delta\theta_{oi}$, который определяется среднеквадратической ошибкой установки луча ФАР и погрешностью установки ОПУА в азимутальной плоскости; $\Delta\theta_{oi}$, $\Delta\theta_{yi}$, которые будут определяться и случайными ошибками фазирования, и ошибками измерения координат минимумов разностных ДН (в рамках принятого алгоритма); $\Delta\Psi_j$, определяемый случайной погрешностью установки ОПУА по углу крена.

Из всего сказанного следует вывод, что для общего случая измерений в косых плоскостях даже погрешность измеряемых аргументов является неопределенной, а задача оценки погрешности вычисления самих функций $\Delta\alpha_{xi,j}$, $\Delta\alpha_{yi,j}$ математическими методами становится непростою и выходит за рамки компетенции авторов.

Но набрав статистику измерений, авторы вполне могли бы оценить тот доверительный интервал, в который укладываются все измеряемые реализации, при воздействии всех случайных факторов проводимых измерений. К сожалению, в рамках настоящей работы эта оценка, ввиду дефицита времени, не проводилась, но вполне может быть осуществима при дальнейшей работе в данном направлении. На практике для предлагаемого метода компенсации это могло бы выглядеть следующим образом.

Рассмотрим измерения, проводимые по одному из сечений на угле крена $\Psi = \Psi_j$. Предложенный метод компенсации до установки РПО предполагает создание откорректированного массива данных координат фазирования на всех возможных углах θ_{oi} , где выполняются условия пеленга $\theta_{oi} = \theta_{yi}$. Впоследствии после установки РПО и соответствующих из-

мерений эти координаты будут использованы для расчета компонент УОП. Таким образом, если провести несколько независимых измерений до установки РПО, а потом такое же количество после установки, то программу расчета (в составе разработанного ПО *Stend BEK*) можно заставить вычислить компоненты УОП перекрестно, объединяя произвольные данные до установки РПО с произвольными данными после его установки. Например, это можно представить как перекрестное объединение измеренных массивов (рис. 12). Таким образом, при трех (см. рис. 12) измерениях до и после получаем 9 реализаций каждой из компонент УОП.

На рис. 13 эти 9 рассчитанных реализаций (например, компоненты $\Delta\alpha_{xi,j}$), представленные вместе, образуют некий статистический «коридор», который может быть положен в основу доверительного интервала измерений.

Использование быстросъемного макета-имитатора РПО с «искусственно» вносимыми неоднородностями

Для отработки методики и сравнения полученных результатов с данными измерений при применении других методик была предложена и изготовлена модель имитатора РПО, обладающая следующими свойствами:

- реальная, наблюдаемая при измерениях способность преломлять фронт падающей

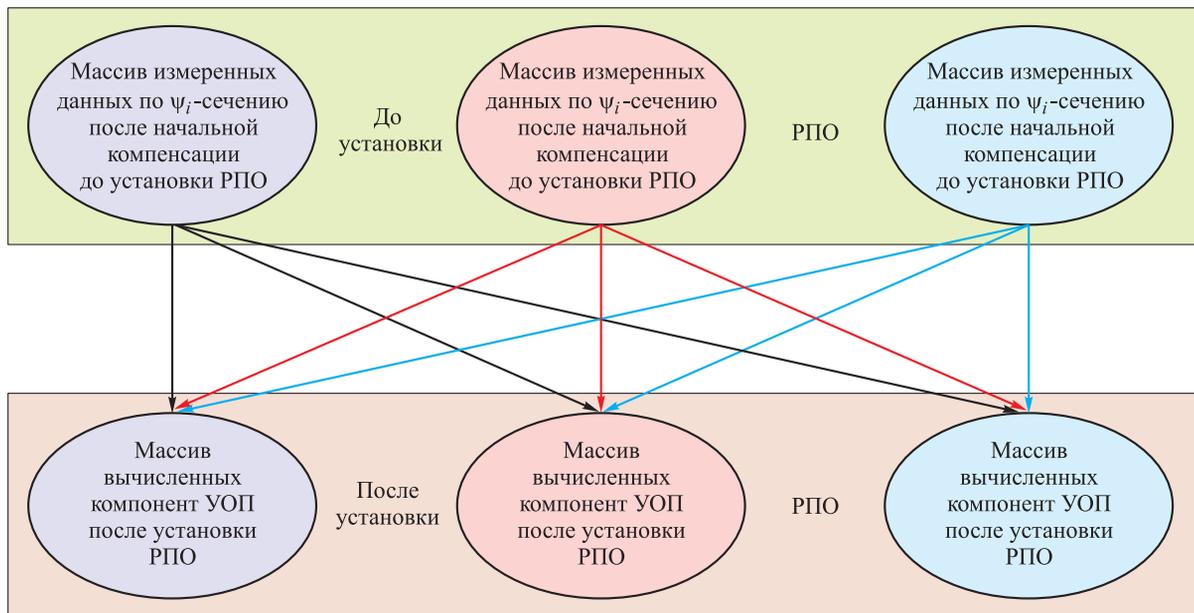


Рис. 12. Статистическая обработка массивов данных на основе объединения измеренных данных

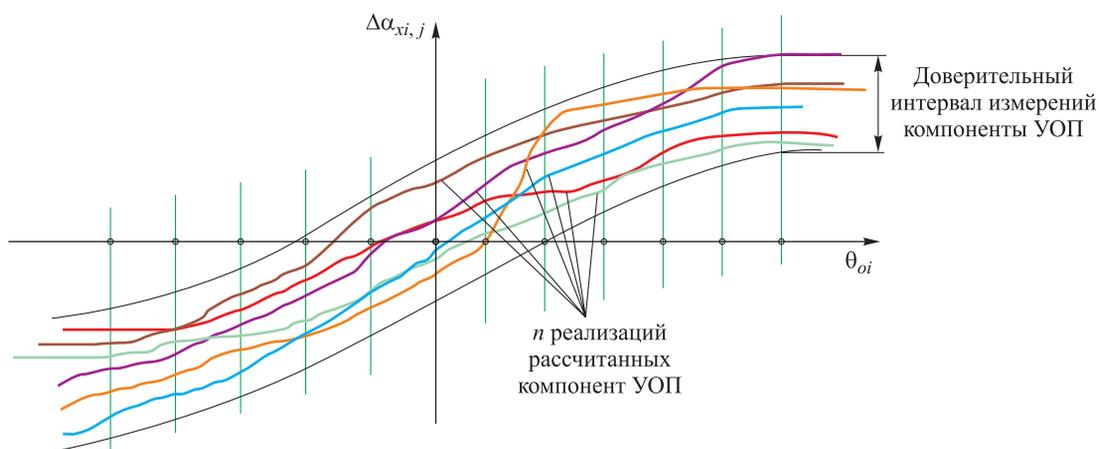


Рис. 13. Получение доверительного интервала рассчитанных реализаций (компоненты $\Delta\alpha_{xi,j}$)

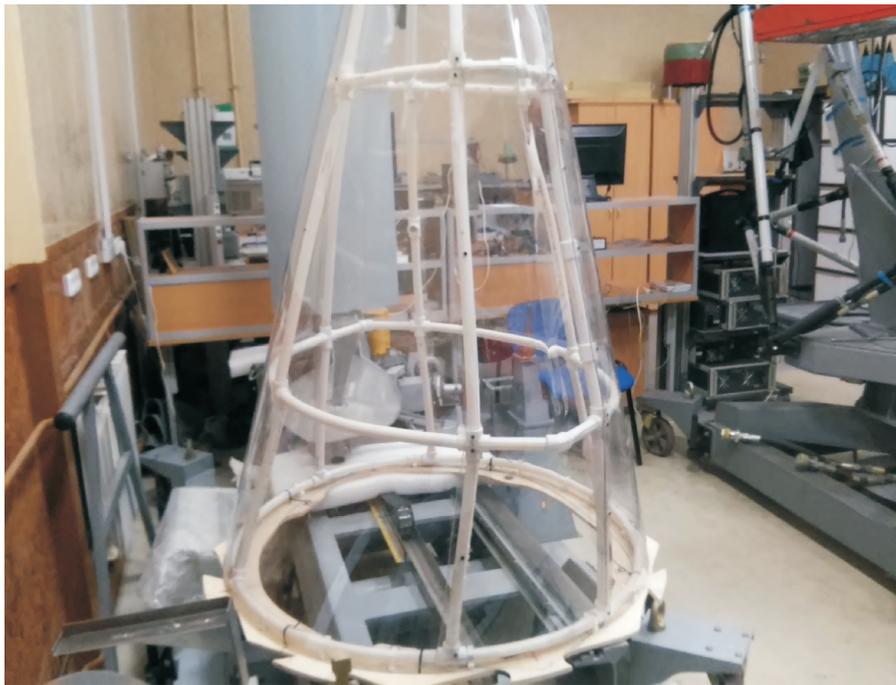


Рис. 14. Модель имитатора РПО

плоской волны (т. е. вносить УОП по обеим компонентам $\Delta\alpha_{xi,j}$ и $\Delta\alpha_{yi,j}$);

- низкий вес, для того чтобы механическое воздействие на приводы ОПУА с установленной на нем системой ФАР – РПО было бы минимальным;

- простота установки и съема макета-имитатора с тестируемой ФАР, установленной на ОПУА, с минимально возможным воздействием на его механические приводы;

- различные участки поверхности имитатора должны обладать различным коэффициентом преломления (как это бывает в реальном РПО).

На рис. 14 представлен изготовленный макет имитатора. Он имел лишь одну (вертикальную) плоскость симметрии и с успехом выполнял свою главную функцию – вносить УОП при установке на тестируемую ФАР.

Результаты измерений УОП, проведенных на макете-имитаторе РПО

Графики компонент УОП, полученные с использованием предлагаемой методики, для изготовленного макета-имитатора РПО на некоторых углах установки системы ФАР – РПО по крену приведены на рис. 15. Частота, на которой проводились измерения, соответствовала длине волны 3 см. Все измерения на ма-

кете-имитаторе РПО представлены на одной частотной литере. Графики компонент ($\Delta\alpha_{xi,j}$ и $\Delta\alpha_{yi,j}$) УОП в угловых минутах в координатах θ, Ψ на углах крена системы $\Psi = \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ$ приведены на рис. 15–17.

Плоскостью симметрии для данного макета-имитатора РПО, схематически показанного на рис. 18, будет вертикальная плоскость, проходящая через его продольную ось. Симметрично расположенные относительно нее точки на поверхности РПО (некоторые из них показаны на рис. 18), по всей видимости, должны обладать схожими свойствами по способности преломлять падающую электромагнитную волну. Из простых представлений геометрической оптики следует, что для компоненты $\Delta\alpha_x$ (ΔA_z – азимутальная составляющая на рис. 18) это совпадение по абсолютной величине и противоположность по знаку. Для компоненты $\Delta\alpha_y$ (ΔU_m – угломестная составляющая на рис. 18) это совпадение по абсолютной величине и по знаку. Приведенные далее графики достаточно наглядно это демонстрируют. Именно по данной причине результаты измерений представлены парными графиками на соответствующих углах $\pm\Psi$.

Отсутствие полной четной или нечетной симметрии отчасти обусловлено значитель-

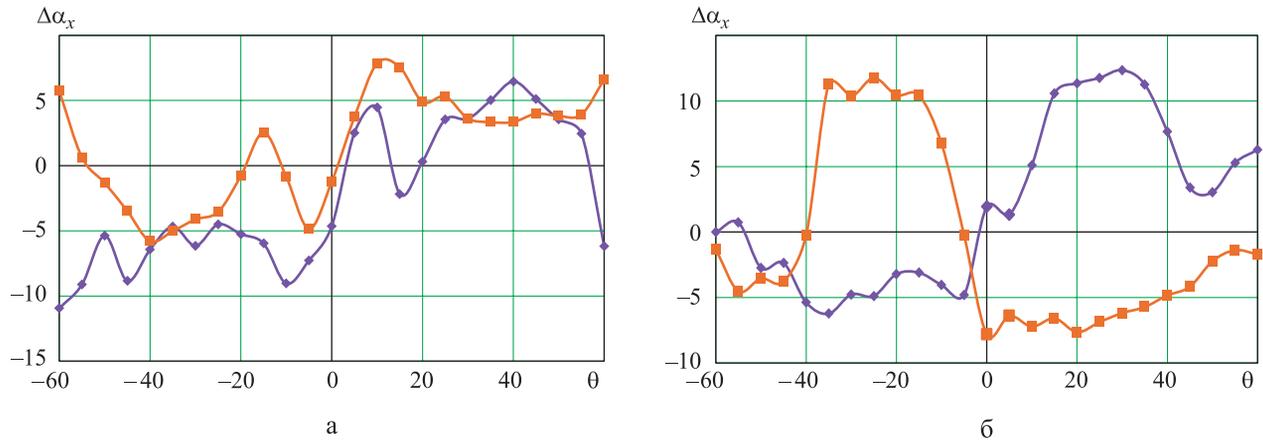


Рис. 15. Компоненты для макета-имитатора при:
а – $\Delta\alpha_{xi,j}$; б – $\Delta\alpha_{yi,j}$; — $\Psi = -30^\circ$; — $\Psi = 30^\circ$

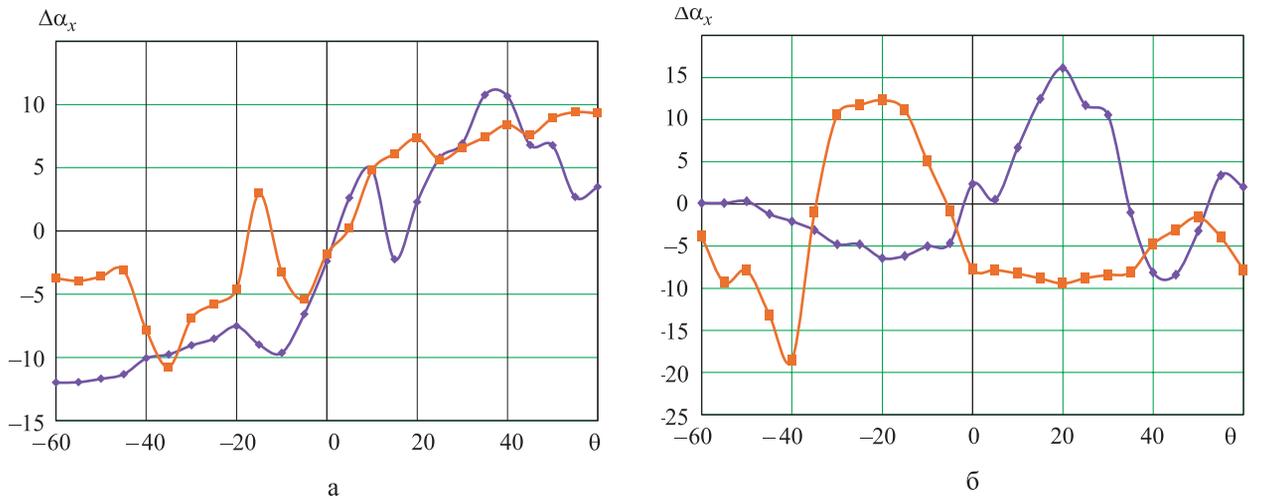


Рис. 16. Компоненты для макета-имитатора при:
а – $\Delta\alpha_{xi,j}$; б – $\Delta\alpha_{yi,j}$; — $\Psi = -45^\circ$; — $\Psi = 45^\circ$

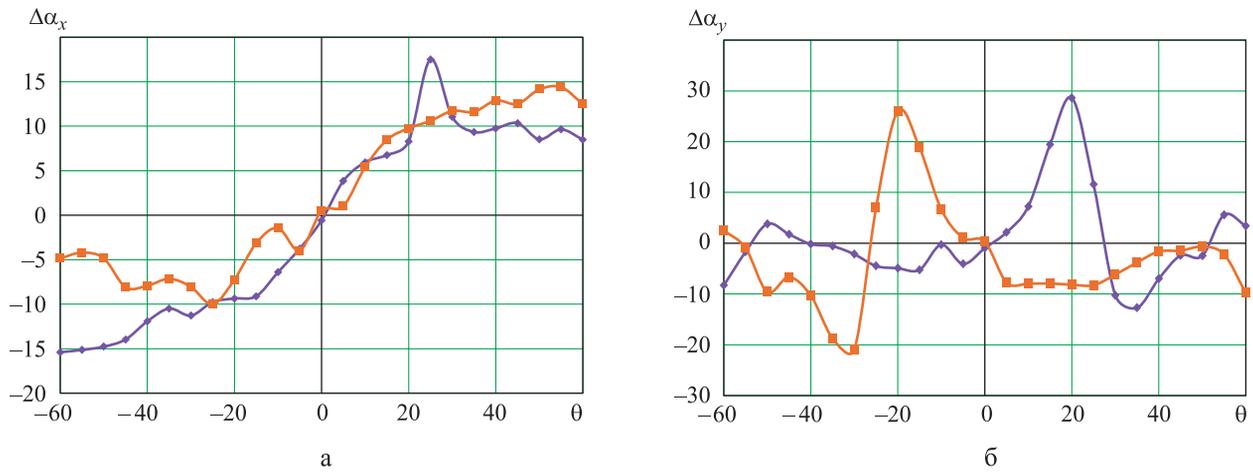


Рис. 17. Компоненты для макета-имитатора при:
а – $\Delta\alpha_{xi,j}$; б – $\Delta\alpha_{yi,j}$; — $\Psi = -60^\circ$; — $\Psi = 60^\circ$

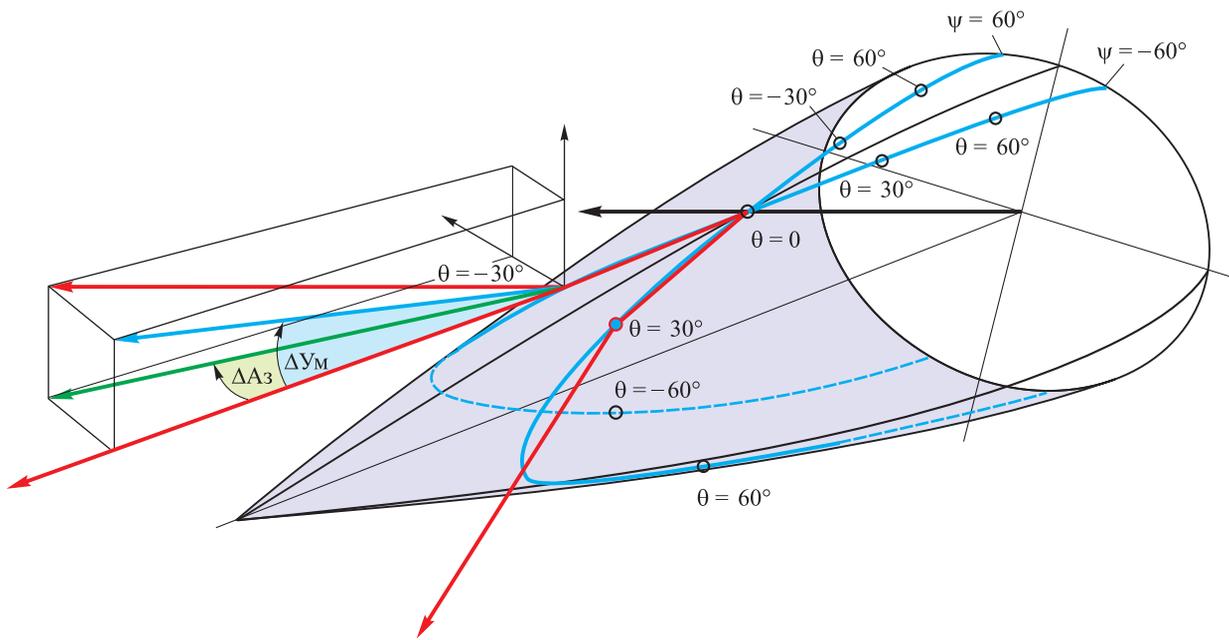


Рис. 18. Схематическое изображение произвольного РПО и характерных точек на его поверхности

ными погрешностями ручного изготовления макета.

Объединенные на графике результаты измерений отдельных компонент УОП ($\Delta\alpha_{xi,j}$ и $\Delta\alpha_{yi,j}$), проведенных на имитаторе РПО для некоторых из его сечений (т. е. на различных углах крена системы антенна – обтекатель), представлены на рис. 19. Плавная эволюция компоненты $\Delta\alpha_x$ по мере приближения от углов $\Psi = +60^\circ$ к предельному углу крена $\Psi = 0^\circ$ прослеживается на рис. 19, а,

а для компоненты $\Delta\alpha_y$ по мере приближения от $\Psi = 30^\circ$ к углу $\Psi = 90^\circ$ на рис. 19, б. Причем на углах установки системы $\Psi = 0^\circ$ и $\Psi = 90^\circ$, где предложенный метод уже не дает результата ввиду вырождения минимума одной из разностных ДН, компоненты были измерены классическим методом разности. Он предполагает вычитание измеренных угловых координат соответствующей разностной ДН до и после установки РПО.

Кроме того, для компоненты УОП $\Delta\alpha_x$ на рис. 20 и для компоненты УОП $\Delta\alpha_y$ на

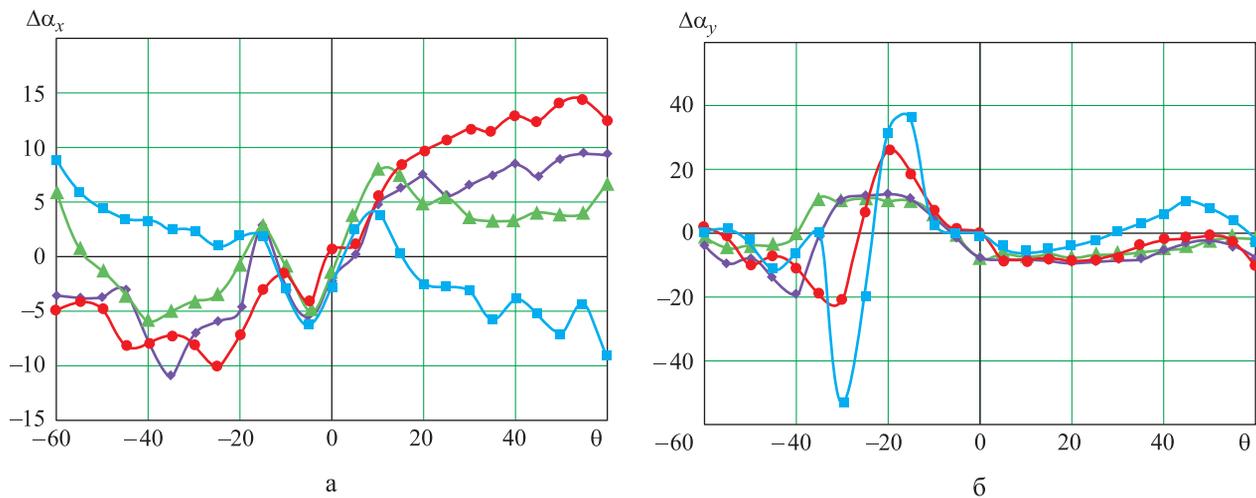


Рис. 19. Объединенные результаты измерений отдельных компонент УОП, проведенных на имитаторе РПО, для некоторых из его сечений Ψ :

а – $\Delta\alpha_x$; — $\Psi = 0^\circ$; — $\Psi = +30^\circ$; — $\Psi = +45^\circ$; — $\Psi = +60^\circ$; б – $\Delta\alpha_y$; — $\Psi = +30^\circ$; — $\Psi = +45^\circ$; — $\Psi = +60^\circ$

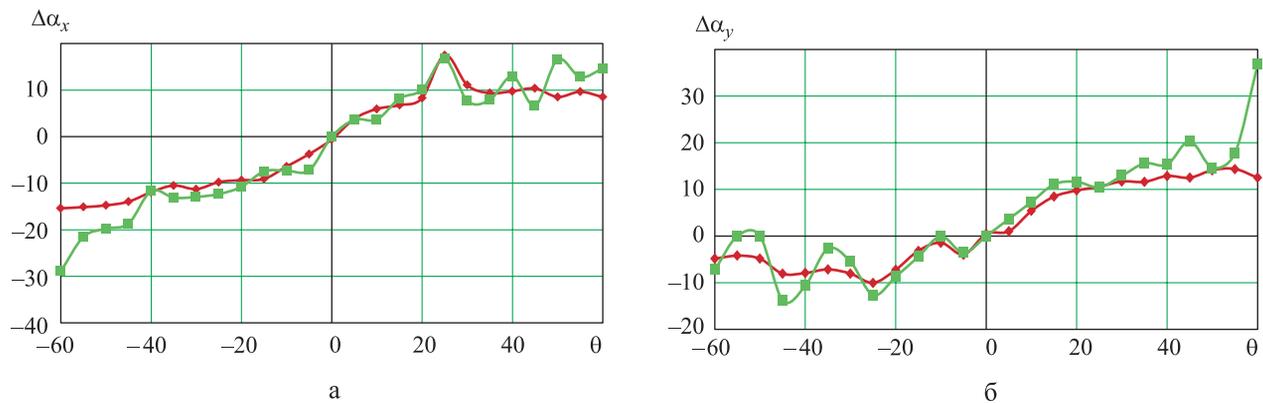


Рис. 20. Сравнительные данные (метод «компенсации» и метод ДПДН) измеренной компоненты $\Delta\alpha_x$ УОП (для макета-имитатора) при $\Psi = -60^\circ$ (а), $\Psi = +60^\circ$ (б):
 — метод компенсации; — метод ДПДН

рис. 21 на угле крена системы $\Psi = \pm 60^\circ$ приведены данные, полученные по другой методике. Суть ее состоит в непосредственном измерении координат пространственного минимума, формируемого динамическими разностными пространственными ДН (ДПДН) тестируемой ФАР [5], до и после установки РПО, когда положение этого минимума изменяется. Измерение разностных ДПДН проводилось при различных углах установки тестируемой ФАР к плоскому фронту падающей от коллиматора электромагнитной волны. Понятие «динамическая» в аббревиатуре ДПДН применено в том смысле, что сами пространственные ДН измерялись в некоторой области отстроя по θ, Ψ относительно начальной установки за счет чисто электронного сканирования луча

ФАР в данной области. Для удобства компоненты УОП, измеренные на модели-имитаторе РПО с применением ДПДН и полученные методом компенсации по сечению $\Psi = \pm 60^\circ$ приведены на графиках вместе. Данная методика, ввиду сложности практической реализации на измерительном комплексе и огромного массива измеряемых при этом данных, пока находится в стадии разработки. Но неплохая повторяемость данных, полученных на одном и том же макете-имитаторе РПО с помощью двух разных подходов, позволяет надеяться, что и метод измерения УОП с применением ДПДН найдет свое место.

Заключение

Описанный способ измерения УОП в доступной для сканирования угловой области ФАР

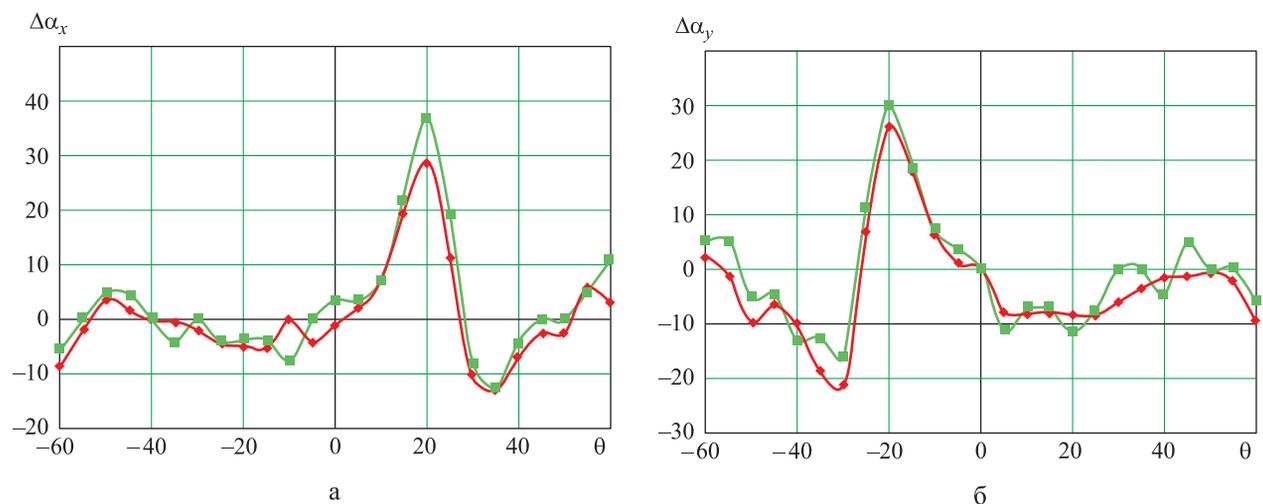


Рис. 21. Сравнительные данные (метод «компенсации» и метод ДПДН) измеренной компоненты $\Delta\alpha_y$ УОП (для макета-имитатора), при $\Psi = -60^\circ$ (а), $\Psi = +60^\circ$ (б):
 — метод компенсации; — метод ДПДН



позволяет определять обе компоненты ошибки, обусловленные наличием обтекателя. Он отличается простотой реализации и математической обработки.

В слепых секторах, близких к ортогональным плоскостям (0° и 90°), там, где минимум сигнала одного из разностных каналов заплывает и становится недоступным для определения его угловой координаты, данный метод перестает работать. По этой причине для его наиболее полного применения важно иметь хороший инструмент, т. е. ФАР с глубиной нулей формируемых разностных ДН не хуже 30–35 дБ. Сектор измерений по Ψ , где минимум разностной ДН (при принятом алгоритме его измерения) мог быть однозначно определен для имевшейся в распоряжении ФАР авторов, был ограничен углами $-30^\circ \dots -70^\circ$ и $+30^\circ \dots +70^\circ$. Компоненты УОП в недоступных для измерения по данному методу слепых зонах могут быть определены, например, методом экстраполяции по соседним измеренным зонам или дополнены данными, измеренными в этих секторах с применением других методов. Перспективным может оказаться метод электронного формирования специальных косых разностных ДН. Следует отметить, что в двух предельных случаях установки системы ФАР – РПО $\Psi = 0^\circ$ или $\Psi = 90^\circ$ формулы (17), (18) для расчета одной из компонент УОП вырождаются в простейшие выражения, по которым вычисляются УОП в классическом методе разности. Таким образом, в двух предельных случаях одна из компонент УОП измеряется хорошо известным способом.

Предложенный способ требует дальнейшего тщательного метрологического исследования для возможной последующей его аттестации и применения в качестве метода определения характеристик системы ФАР (АФАР) – РПО (УОП, КП обтекателя и т. д.).

Список литературы

1. Капун В. А. Обтекатели антенн СВЧ (Радиотехнический расчет и проектирование). М.: Советское радио, 1974. 240 с.
2. Столбовой В. С., Турко Л. С., Залетин П. В. Пеленгационная характеристика системы «антенна-обтекатель» и пути повышения точности пеленгации радиолокационных объектов // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2016. № 1. С. 52–60.
3. Столбовой В. С., Турко Л. С., Залетин П. В. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение компенсации пеленгационных ошибок систем «антенна – обтекатель» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2016. № 3. С. 15–23.
4. Способ измерения пеленгационных ошибок систем антенна – обтекатель / Столбовой В. С. Пат. RU № 2162232, МПК G01R 29/10. Опубл. 20.01.2001. Бюл. № 2.
5. Гаврилова С. Е., Грибанов А. Н., Мосейчук Г. Ф., Синани А. И. Особенности реконструкции возбуждения в раскрыве плоской многоэлементной фазированной антенной решетки с использованием динамических диаграмм направленности // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2017. № 4. С. 32–39.

Поступила 29.11.18

Макушкин Игорь Евгеньевич – начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: антенные измерения.

Дорофеев Александр Евгеньевич – инженер-программист первой категории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: автоматизация антенных измерений.

Грибанов Александр Николаевич – кандидат технических наук, начальник сектора Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.
Область научных интересов: математическое моделирование и оптимизация характеристик излучения ФАР.



Гаврилова Светлана Евгеньевна – инженер первой категории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.

Область научных интересов: активные и пассивные антенные решетки, СВЧ-техника.

Синани Анатолий Исакович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский.

Область научных интересов: активные и пассивные антенные решетки, СВЧ-техника.

A method for measuring angular bearing errors in the “antenna – radome” system in the phased-array beam scanning region

The paper introduces a method for measuring angular bearing errors in an antenna-radome system in a two-dimensional angular region of scanning of electronically steerable antenna, i.e. phased array antenna, active phased array antenna. The measurements were based on an antenna measuring collimator system – “compact testing ground”. The mathematical expressions used in processing the obtained data are given. To make a matrix of angular bearing errors, measurements are carried out at different angles of the heel of the antenna – radome system when the phased array antenna beam is deflected in oblique planes. To perfect the method at the initial stage, we used a quick-release model of the radome, which has the ability to introduce angular bearing errors.

Keywords: phased array antenna, electronically steerable antenna, radioparent radome, angular bearing errors.

Makushkin Igor Evgenievich – Head of Laboratory, Joint-Stock Company “V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.

Science research interests: antenna measurements.

Dorofeev Aleksandr Evgenievich – programmer engineer of 1st category, Joint-Stock Company “V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.

Science research interests: antenna measurements automation.

Gribanov Aleksandr Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Sector, Joint-Stock Company “V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.

Science research interests: mathematical simulation, optimization of radiation characteristics of phased-array antenna.

Gavrilova Svetlana Evgenievna – Engineer of the 1st category Joint-Stock Company “V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.

Science research interests: active and passive antenna arrays, microwave technology.

Sinani Anatoliy Isakovich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy General Director for Research, Joint-Stock Company “V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Zhukovskiy.

Science research interests: active and passive antenna arrays, microwave technology.