Аналитическое представление крупноапертурной стационарной фазированной антенной решетки

Analytical representation of the stationary cophased array

Козлов / Kozlov N.
Николай Аифалович
(Kna.32@yandex.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Прокофьев / Prokofjev A.
Александр Валерьевич
(prokofjev_alexander@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА имени А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательского отдела.
г. Санкт-Петербург

Сергеев / Sergeev D.
Дмитрий Викторович
(sergeevdmitriyV@yandex.ru)
кандидат технических наук.
ВКА имени А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательской лаборатории – старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Андриевская / Andrievskaya V.
Виктория Юрьевна
(vika75_07@mail.ru)
кандидат физико-математических наук, доцент.
ВКА имени А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: фазированная антенная решетка – cophased array; геодезический контроль – geodesic control; деформация – deformation; азимут и угол места нормали – azimuth and elevation.

Статья посвящена аналитическому представлению крупноапертурной стационарной фазированной антенной решетки. Акцентируется внимание на определении геодезических параметров нормали в точке к деформированной поверхности полотна фазированной антенной решетки и фактических параметров шагов между излучателями в пространственной прямоугольной системе координат по положению конечных элементов эквивалентных линейных антенных решеток. Доказывается возможность методического устранения погрешностей сканирования диаграммой направленности антенны, вызываемых деформациями фазированной антенной решетки от нагрузок и воздействий внешней среды.

Article is devoted to analytical representation of stationary cophased array. Attention is focused on determination of geodesic parameters standard in a point to the deformed surface of a cophased array cloth and the actual parameters of steps between radiators in a spatial rectangular coordinate system under the provision of terminal elements of the equivalent linear arrays. The possibility of methodical elimination of the errors of scanning by the direction characteristic of the array caused by deformations of the cophased array from loadings and influences of an external environment is proved.

С позиции геометрии крупноапертурная стационарная фазированная антенная решетка (ФАР) описывается как совокупность простейших слабонаправленных излучателей, размещаемых в проектной плоскости антенного полотна через равные шаги по строкам и столбцам линейных антенных решеток [1]. Такое представление ФАР содержит некоторую неопределенность, обуславливающую необходимость учета параллельности строк излучателей к плоскости земного горизонта и перпендикулярности столбцов излучателей к ним и др. Совокупность независимых уточняющих условий затрудняет решение прикладных задач и негативно отражается на этапах создания и эксплуатации ФАР.

С целью обеспечения принципа формирования диаграммы направленности (ДН) антенны, нормативно-технической документацией предъявляются допуски к взаимному положению антенных секций, модулей, равенству шагов между излучателями.

Но даже при их соблюдении фактическая геометрия антенного полотна может отличаться от проекта. Так, например, в результате поэтапного приведения конечного элемента (излучателя) столбца линейной антенной решетки (АР) в проектное положение, прямая $OM-1$ принимает форму ломаной линии $O\,1'\,2'\,m'\ldots M-1'$ (рис. 1).

Существующее аналитическое представление ФАР [2] отразилось и на их геодезическом обеспечении, основной задачей которого является определение и

Рис. 1. Приведение элементов АР

контроль азимута и угла места нормали к плоскости антенного полотна. По всей видимости, предполагалось, что другие параметры ФАР соответствуют проектным требованиям. Однако ряд экспериментальных исследований свидетельствует, что в процессе создания и эксплуатации ФАР подвержены деформациям сложного характера (осадки, крены, прогибы, азимутальные развороты) [3].

Неопределенность в аналитическом представлении ФАР удается устранить в том случае, если ФАР представить как совокупность излучателей, размещаемых через равные шаги между излучателями d_x, d_y, d_z в системе координат $\{Oxyz\}$ (рис. 2).

Величины шагов d_x, d_y, d_z первичны и при их постоянстве все излучатели размещаются в одной плоскости, что позволяет осуществлять переход к размерности шагов в плоскости антенного полотна d_n, d_m, к кренам строк и столбцов линейных антенных решеток. В процессе строительно-монтажных работ размещение излучателей необходимо контролировать в системе координат антенной решетки с началом в нулевом излучателе (O), вычисляемым по значениям проектных шагов:

$$x_i = x_0 + nd_x;\ y_i = y_0 + md_y;\ z_i = z_0 + md_z, \qquad (1)$$

где x_i, y_i, z_i – пространственное положение излучателей;

x_0, y_0, z_0 – пространственное положение нулевого излучателя (O);

n – порядковый номер столбца линейной АР, $n \in 0...N-1$;

m – порядковый номер строки линейной АР, $m \in 0...M-1$.

Контроль взаимного положения излучателей ФАР с учетом формулы (1) способствует устранению накопления погрешностей в процессе возведения конструкции ФАР.

На практике предъявляются повышенные требования к точности определения взаимного положения излучателей ФАР. Применение современных электронных тахеометров и методики [4] позволяет осуществлять геодезический контроль параметров x_i, y_i, z_i со средней квадратической погрешностью, не превышающей 1 мм.

Необходимо отметить, что приращения параметров приводят к появлению следующих погрешностей радиолокационных измерений – смещению в исходном положении ДН антенны и погрешностям ее сканирования в главных плоскостях (азимутальной и угломестной). С учетом этого геодезическое обеспечение ФАР должно сводиться к решению следующих задач:

– определению исходных геодезических параметров (азимута и угла места) нормали в точке к поверхности деформированного полотна ФАР;

– созданию условий методической компенсации погрешностей сканирования, вызываемых несоответствием фактических и проектных значений параметров шагов между излучателями АР.

Решение этих задач рассмотрим на примере геометрической интерпретации деформированной линейной АР, проекции которой в плоскостях XOY и XOZ представлены ломаными линиями (рис. 3).

В данном случае положение элементов решетки не совпадает с их проектными значениями на величины средних искажений параметров d_x, d_y, d_z в соответствующих столбцах (строках), вызываемых откло-

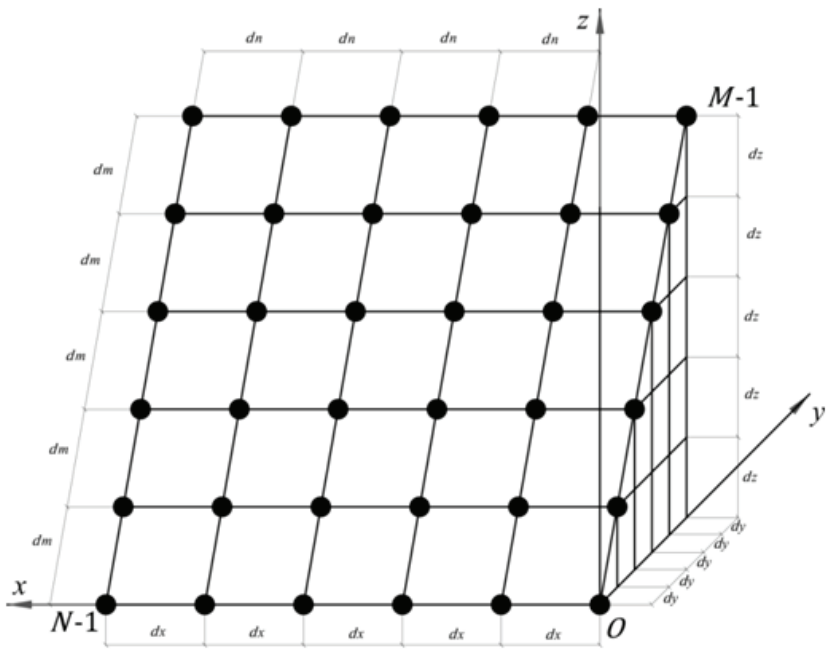

Рис. 2. Представление исходных параметров в пространственной прямоугольной системе координат

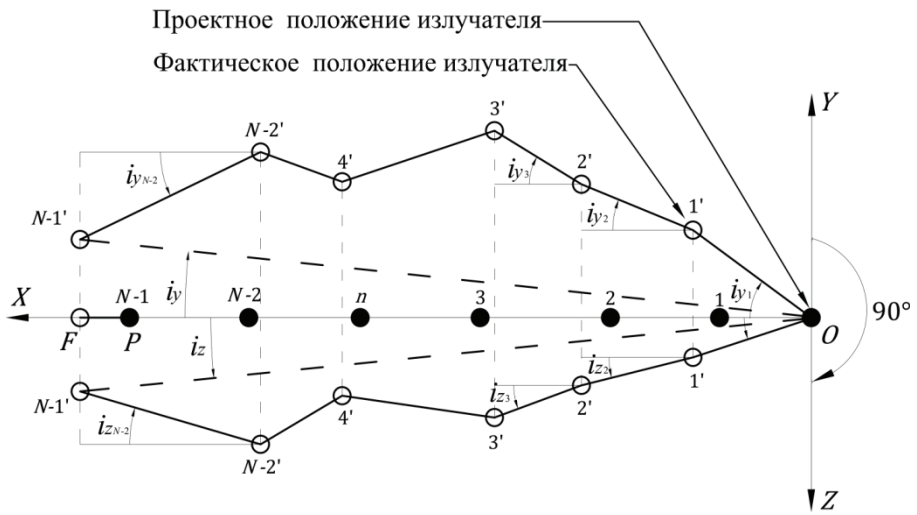

Рис. 3. Геометрическая интерпретация деформированной линейной АР

нениями координат излучателей от их проектного положения.

Обозначим координаты элементов деформированной линейной решетки через X_n, Y_n, Z_n, тогда малые развороты i_{y_n}, i_{z_n} сторон линейных решеток, вызывающие смещение диаграммы направленности антенны по азимуту и углу места, можно представить следующими выражениями:

$$i_{y_1} = \rho\frac{(Y_1 - Y_0)}{d_x};\ i_{y_2} = \rho\frac{(Y_2 - Y_1)}{d_x};\ i_{y_{N-1}} = \rho\frac{(Y_{N-1} - Y_{N-2})}{d_x};$$
$$i_{z_1} = \rho\frac{(Z_1 - Z_0)}{d_x};\ i_{z_2} = \rho\frac{(Z_2 - Z_1)}{d_x};\ i_{z_{N-1}} = \rho\frac{(Z_{N-1} - Z_{N-2})}{d_x}, \quad (2)$$

где

Y_0, Y_1, $Y_2,...,Y_{N-2}, Y_{N-1}$, – координаты излучателей в плоскости XOY;

Z_0, Z_1, $Z_2,...,Z_{N-2}, Z_{N-1}$, – координаты излучателей в плоскости XOZ;

i_{y_1}, i_{y_2}, $i_{y_{N-1}}$ –крены сторон между смежными излучателями в плоскости XOY;

i_{z_1}, i_{z_2}, $i_{z_{N-1}}$ – крены сторон между смежными излучателями в плоскости XOZ;

ρ – количество секунд в радиане, $\rho = 206265''$.

Величины среднего разворота сторон линейной решетки по азимуту и углу места рассчитываются по формулам

$$i_y = \rho\frac{(Y_{N-1} - Y_0)}{(N-1)\cdot d_x};\ i_z = \rho\frac{(Z_{N-1} - Z_0)}{(N-1)\cdot d_x}, \quad (3)$$

где i_y, i_z – величина среднего разворота сторон линейной решетки по азимуту, углу места;

$N-1$ – количество сторон линейной решетки.

Из формул (3) видно, что величина среднего разворота линейной решетки зависит от положения ее крайних элементов Z_{N-1}, Z_0 и Y_{N-1}, Y_0. К аналогичному заключению приходим и по многоугольнику с вершинами O, $1'$, $2'$, $n,...,N-1'$ (рис. 3). При относительно малых разворотах отдельных сторон линейной решетки сумма положительных и отрицательных разворотов между элементами относительно прямой $ON-1'$ равна нулю, а среднему развороту строки линейной решетки относительно оси OX соответствует угол i. При этом длина отрезка PF равна сумме искажений шагов решетки по оси OX, а ее величина определяет суммарную погрешность в углах сканирования ДН антенны. Так, погрешность максимума излучения в направлении $\theta_м$ от приращения шага Δd одной стороны строки (столбца) линейной АР определяется формулой

$$\Delta\theta_м = \rho\cdot \mathrm{tg}\theta\frac{\Delta d}{d} \quad (4)$$

где θ – направление излучения ДН антенны;

d – шаг строки (столбца) линейной АР.

Тогда при условии равенства нулю суммы всех погрешностей шагов строки (столбца) линейной АР, суммарная погрешность сканирования относительно всех сторон решетки также будет равна нулю, а максимум диаграммы направленности совпадет с перпендикуляром к строке $ON-1'$.

Условие взаимной компенсации погрешностей сканирования достигается, если проектные шаги строк (столбцов) линейной АР заменить их фактическими величинами, вычисляемыми по координатам конечных элементов эквивалентной линейной АР.

Таким образом, контроль деформаций ФАР должен сводиться к определению плоских прямоугольных координат и высот излучателей, размещаемых по контуру ФАР с последующим вычислением по ним координат элементов строки и координат элементов столбца эквивалентных линейных АР по формулам

Таким образом, контроль деформаций ФАР должен сводиться к определению плоских прямоугольных координат и высот излучателей, размещаемых по контуру ФАР с последующим вычислением по ним координат элементов строки $\{N-1;\ O\}$ и координат элементов столбца $\{M-1;\ O\}$ эквивалентных линейных АР по формулам

$$X_{N-1} = \frac{\sum_0^{M-1}(x_{N-1} - x_0)}{M};\ Y_{N-1} = \frac{\sum_0^{M-1}(y_{N-1} - y_0)}{M};$$
$$Z_{N-1} = \frac{\sum_0^{M-1}(z_{N-1} - z_0)}{M};$$
$$X_{M-1} = \frac{\sum_0^{N-1}(x_{M-1} - x_0)}{N};\ Y_{M-1} = \frac{\sum_0^{N-1}(y_{M-1} - y_0)}{N};$$
$$Z_{M-1} = \frac{\sum_0^{N-1}(z_{M-1} - z_0)}{N}, \quad (5)$$

где X_{N-1}, Y_{N-1}, Z_{N-1} – пространственные прямоугольные координаты элементов строки АР;

X_{M-1}, Y_{M-1}, Z_{M-1} – пространственные прямоугольные координаты элементов столбца АР;

x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1} – плоские прямоугольные координаты и высоты строки излучателей в плоскости АР;

x_{M-1}, y_{M-1}, z_{M-1} – плоские прямоугольные координаты и высоты столбца излучателей в плоскости АР;

M, N – количество строк, столбцов излучателей АР.

Далее по координатам конечных элементов линейной решетки вычисляют фактические шаги строки и столбца линейной АР

$$d^{ф}_{X(n)} = \frac{X_{N-1}}{N-1};\ d^{ф}_{Y(n)} = \frac{Y_{N-1}}{N-1};\ d^{ф}_{Z(n)} = \frac{Z_{N-1}}{N-1};$$
$$d^{ф}_{X(m)} = \frac{X_{M-1}}{M-1};\ d^{ф}_{Y(m)} = \frac{Y_{M-1}}{M-1};\ d^{ф}_{Z(m)} = \frac{Z_{M-1}}{M-1}, \quad (6)$$

где $d^{\Phi}_{X(n)}$, $d^{\Phi}_{Y(n)}$, $d^{\Phi}_{Z(n)}$ – фактические шаги строки излучателей линейной АР в общеземной системе координат;

$d^{\Phi}_{X(m)}$, $d^{\Phi}_{Y(m)}$, $d^{\Phi}_{Z(m)}$ – фактические шаги столбца излучателей линейной АР общеземной системе координат.

После чего рассчитывают фактический шаг строки d^{Φ}_{n}, столбца d^{Φ}_{m} в плоскости АР по формулам

$$d^{\Phi}_{n} = \sqrt{\left(d^{\Phi}_{X(n)}\right)^2 + \left(d^{\Phi}_{Y(n)}\right)^2 + \left(d^{\Phi}_{Z(n)}\right)^2};$$
$$d^{\Phi}_{m} = \sqrt{\left(d^{\Phi}_{X(m)}\right)^2 + \left(d^{\Phi}_{Y(m)}\right)^2 + \left(d^{\Phi}_{Z(m)}\right)^2}, \quad (7)$$

а также величины углов крена строки и столбца эквивалентных линейных АР по формулам

$$i_x = \mathrm{arctg}\frac{d^{\Phi}_{Z(n)}}{(N-1)d^{\Phi}_{n}}; \quad i_y = \mathrm{arctg}\frac{d^{\Phi}_{X(m)}}{(M-1)d^{\Phi}_{m}}. \quad (8)$$

Координаты вектора нормали $\vec{n}$ к плоскости АР, проведенной через вектора $\overrightarrow{O(N-1)}$ и $\overrightarrow{O(M-1)}$, определяют по формулам скалярного произведения

$$X_{\vec{n}} = \begin{vmatrix} Y_{N-1} & Z_{N-1} \\ Y_{M-1} & Z_{M-1} \end{vmatrix}; \; Y_{\vec{n}} = \begin{vmatrix} Z_{N-1} & X_{N-1} \\ Z_{M-1} & X_{M-1} \end{vmatrix}; \; Z_{\vec{n}} = \begin{vmatrix} X_{N-1} & Y_{N-1} \\ X_{M-1} & Y_{M-1} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где $X_{\vec{n}}, Y_{\vec{n}}, Z_{\vec{n}}$ – координаты вектора нормали $\vec{n}$ к плоскости АР.

Тогда азимут A и угол места нормали к плоскости АР будут получены из выражений

$$A = \mathrm{arctg}\frac{Y_{\vec{n}}}{X_{\vec{n}}} + \left(L - L_0\right)\sin B; \; \varepsilon = \mathrm{arctg}\frac{\sqrt{X_{\vec{n}}^{\,2} + Y_{\vec{n}}^{\,2}}}{Z_{\vec{n}}}, \quad (10)$$

где L, B – геодезические координаты точки стояния ФАР;

L_0 – долгота осевого меридиана.

Результаты экспериментальных исследований [5] показывают, что диаграмма направленности антенны деформированной ФАР практически совпадает с нормалью к плоскости, проходящей через конечные элементы эквивалентной линейной АР. Существенные погрешности сканирования ДН от перемещений внутренних элементов (излучателей) возникают при сложном характере деформаций ФАР, когда внутренние излучатели строки (столбца) линейной АР, ближайшие к крайним элементам, оказываются по разные стороны относительно отрезков $ON-1'$ и $OM-1'$. Влияние перемещений внутренних элементов строки (столбца) на исходное положение ДН антенны снижается до нуля с приближением их к середине линейной АР.

Предложенный подход к аналитическому представлению ФАР позволяет устранять погрешности сканирования ДН антенны, вызываемые деформациями антенного полотна. Однако для обеспечения требуемого уровня других характеристик антенн (боковых лепестков, коэффициента направленного действия антенны) необходимым условием является наличие юстировочных устройств на ФАР, позволяющих осуществлять приведение плоскости антенного полотна и пространственного положения излучателей в проектное положение по результатам геодезического контроля.

Литература

1. Леонов, С. А. Радиолокационные средства противовоздушной обороны / С.А. Леонов. – М.: Воениздат, 1988. – 180 с.

2. Волков, А. А. Особенности геодезического обеспечения стационарных антенных устройств системы предупреждения о ракетном нападении Войск воздушно-космической обороны / А.А.Волков // Труды конференции. Открытое акционерное общество «РТИ», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – С. 630–639.

3. Сергеев, Д. В. Основы единой методики комплексного геодезического контроля с применением косвенного ориентирования в процессе жизненного цикла радиолокационных станций высокой заводской готовности / Д.В. Сергеев // Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения Воздушно-космической обороны (РТИ Системы ВКО-2014): II Всероссийская научно-техн. конф.: Сборник материалов. – М.: Радиотехника, 2014. – С. 345–353.

4. Геодезический контроль деформаций сооружений на основе косвенных способов геодезического ориентирования / В.Ф. Алексеев [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 2. – С. 78–82.

5. Козлов, Н. А. Моделирование и оценка влияния деформаций фазированной антенной решетки на характеристики РЛС ВЗГ при организации мониторинга технического состояния сложных систем / Н.А. Козлов, В.М. Краснов, Д.В. Сергеев // Труды Всероссийской НПК «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – Т. 1. – С. 338–342.