



УДК 621.396.67

В. С. Столбовой, Л. С. Турко, П. В. Залётин

Алгоритмическое и аппаратурное обеспечение компенсации пеленгационных ошибок систем «антенна – обтекатель»

Рассмотрены решения, позволяющие повысить точность пеленгации и сопровождения радиолокационных объектов бортовыми радиолокационными станциями (РЛС) с системами «антенна – обтекатель» (А–О). Разработаны алгоритмы аппаратурной компенсации пеленгационных ошибок на основе узловых данных. Предложен метод формирования узловых данных по результатам экспериментальных измерений, осуществляемых с помощью автоматизированных комплексов, даны практические рекомендации по его применению. На основе разностных матриц разработана методика расчета погрешностей представления данных разными методами и получены аналитические соотношения для обоснованного выбора вида компенсирующих массивов.

Ключевые слова: система «антенна – обтекатель», компенсация пеленгационных ошибок, оптимальные алгоритмы обработки информации, точность пеленгации, бортовая РЛС.

Введение

Стремительный рост скоростей и маневренности летательных аппаратов приводит к необходимости ужесточения требований к точности пеленгации и повышению устойчивости сопровождения радиолокационных объектов. Однако к настоящему времени технологические приемы уменьшения угловых ошибок радиопрозрачных обтекателей практически исчерпаны, что диктует необходимость разработки методов и средств аппаратурной компенсации пеленгационных искажений, возникающих в системе «антенна – обтекатель» (А–О). Для этого необходим новый обобщенный подход к анализу пеленгационной характеристики (ПХ) системы А–О, базирующийся на представлении ПХ в виде полинома n -го порядка, который в отличие от традиционного подхода основан на простой линеаризации ПХ.

В работе [1] дано теоретическое обоснование и получены общие аналитические соотношения, позволяющие синтезировать блок-схемы пеленгаторов различного порядка с аппаратурной компенсацией. Для реализации этих пеленгаторов на практике возникает необходимость решения задач измерения, дискретизации и обработки данных, связанных с хранением информации о динамически изменяющейся в процессе сканирования ПХ системы «антенна – обтекатель», а также задач восстановления значений коэффициентов разложения ПХ, соответствующих текущему угловому положению антенны относительно

обтекателя. Это обуславливает актуальность разработки оптимальных алгоритмов обработки и преобразования сигналов, а также методов их тестирования на основе заданных требований к точности компенсации и имеющихся ресурсов долговременной памяти бортового компьютера.

Возможности аналитического представления ПХ системы А–О на основе теоретических расчетов весьма ограничены, поэтому одним из путей реализации высокоточной пеленгации является использование результатов экспериментального измерения коэффициентов разложения ПХ с помощью специальных измерительных комплексов [2, 3].

Упрощенная блок-схема измерителя представлена на рис. 1.

С помощью управителя выход СВЧ-генератора поочередно подключается к неподвижным излучателям, разнесенным в пространстве. Синхронно с подключением излучателей к выходу СВЧ-генератора к выходу пеленгационного приемника последовательно подключаются соответствующие входы устройств выборки и хранения. В результате на выходах этих устройств сохраняется текущая информация о значениях сигналов, полученных от каждого излучателя. Угловое положение $\Delta\alpha_i$ каждого i -го излучателя предварительно измеряется, запоминается и хранится в блоке решения системы n -линейных уравнений для ПХ $\beta_{iA-O} \{\beta, [\alpha_x, \alpha_y]\}$. С помощью этих данных производится решение приведенной ниже системы n -линейных уравнений:

© Столбовой В. С., Турко Л. С., Залётин П. В., 2016

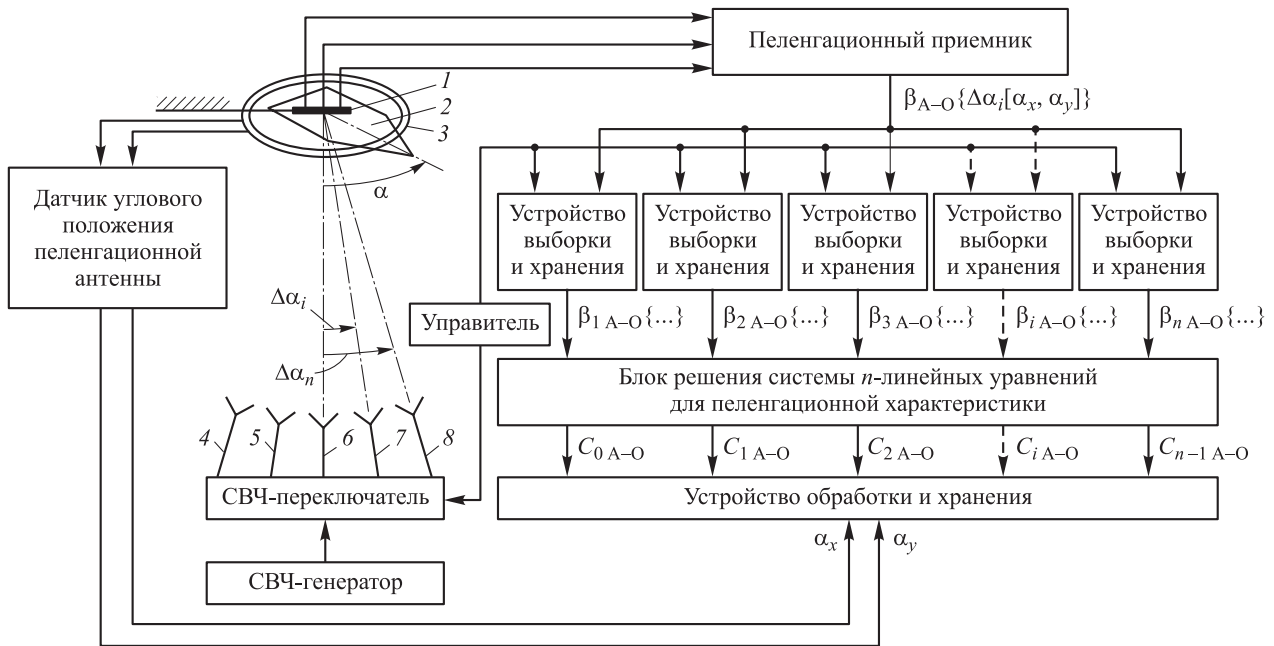


Рис. 1. Блок-схема измерителя пеленгационных характеристик систем «антенна – обтекатель»: 1 – пеленгационная антенна; 2 – обтекатель; 3 – поворотный стэнд; 4, 5, 6, 7, 8 – излучатели 1, 2, 3, *i*, *n*

$$\begin{cases}
 \beta_{1A-O} \{ \Delta \alpha_1 [\alpha_x, \alpha_y] \} = C_{0A-O} + C_{1A-O} \Delta \alpha_1 + \\
 + C_{2A-O} (\Delta \alpha_1)^2 + \dots + C_{n-1A-O} (\Delta \alpha_1)^{n-1}, \\
 \beta_{2A-O} \{ \Delta \alpha_2 [\alpha_x, \alpha_y] \} = C_{0A-O} + C_{1A-O} \Delta \alpha_2 + \\
 + C_{2A-O} (\Delta \alpha_2)^2 + \dots + C_{n-1A-O} (\Delta \alpha_2)^{n-1}, \\
 \dots \dots \dots \\
 \beta_{iA-O} \{ \Delta \alpha_i [\alpha_x, \alpha_y] \} = C_{0A-O} + C_{1A-O} \Delta \alpha_i + \\
 + C_{2A-O} (\Delta \alpha_i)^2 + \dots + C_{n-1A-O} (\Delta \alpha_i)^{n-1}, \\
 \dots \dots \dots \\
 \beta_{nA-O} \{ \Delta \alpha_n [\alpha_x, \alpha_y] \} = C_{0A-O} + C_{1A-O} \Delta \alpha_n + \\
 + C_{2A-O} (\Delta \alpha_n)^2 + \dots + C_{n-1A-O} (\Delta \alpha_n)^{n-1},
 \end{cases} \quad (1)$$

где $C_{0A-O}, C_{1A-O}, C_{2A-O}, \dots, C_{n-1A-O}$ – искомые коэффициенты разложения ПХ системы А–О.

Одновременно с этими данными в устройство обработки и хранения узловых данных поступает информация об угловом положении пеленгационной антенны относительно обтекателя.

Методика измерений с помощью данного автоматизированного комплекса сводится к тому, что пеленгационная антенна в пространстве остается неподвижной, а обтекатель с помощью специального поворотного устройства перемещается в заданном диапазоне углов прокачки. При этом для обеспечения достоверно-

сти испытаний положения пеленгационной антенны относительно обтекателя и ее осей прокачки должны соответствовать реальному изделию. Фиксация пеленгационной антенны в пространстве может осуществляться с помощью неподвижной консоли, специальных кинематических схем [4, 5] или с помощью систем гироскопической стабилизации.

Получение экспериментальных данных осуществляется путем прокачки обтекателя по фиксированным траекториям, которые могут соответствовать полярным сечениям или растровому обзору телесного угла, совпадающего с рабочим диапазоном углов прокачки пеленгационной антенны относительно обтекателя. В последнем случае реализация поворотного устройства связана со сложностью обеспечения механической стабильности положения обтекателя относительно неподвижной пеленгационной антенны, поскольку поворотное устройство должно иметь три степени свободы. Гораздо проще реализовать поворотное устройство с полярным сканированием, в котором прокачка обтекателя осуществляется только в горизонтальной плоскости для различных углов поворота системы А–О по крену. При такой кинематической схеме обеспечивается большая жесткость конструкции, мень-



ший вклад инструментальных погрешностей, к тому же она более применима на практике.

Разработка методов интерполяции по узловым данным о ПХ системы «антенна – обтекатель»

При фиксированных поляризационных параметрах падающей электромагнитной волны нормированную ПХ $\beta_{A-O}\{\beta, [\alpha_x, \alpha_y]\}$ системы А–О для каждого из каналов пеленгации можно представить в обобщенном виде [1]:

$$\beta_{A-O}\{\beta, [\alpha_x, \alpha_y]\} = C_{0A-O}[\alpha_x, \alpha_y] + C_{1A-O}[\alpha_x, \alpha_y]\beta + C_{2A-O}[\alpha_x, \alpha_y]\beta^2 + C_{3A-O}[\alpha_x, \alpha_y]\beta^3 + \dots, \quad (2)$$

где $\beta_{A-O}\{\dots\}$ – угловое отклонение радиолокационного объекта на выходе пеленгационного приемника, измеренное системой А–О;

α_x, α_y – угловое положение пеленгационной антенны относительно обтекателя;

β – угловое положение радиолокационного объекта в плоскости пеленгации.

Здесь коэффициенты ряда $C_{0A-O}[\dots]$ характеризуют смещение нуля ПХ системы А–О, $C_{1A-O}[\dots]$ – крутизну нормированной ПХ системы А–О, $C_{2AO}[\dots]$, $C_{3AO}[\dots]$, ... – искажения 2-го и более высоких порядков.

В работах [1, 6, 7] приведены блок-схемы пеленгаторов различного порядка с компенсацией пеленгационных искажений системы А–О. Основными элементами пеленгатора n -го порядка (рис. 2) являются: датчики параметров пеленгации (частоты, поляризационных характеристик падающей волны и т. п.); устройство хранения узловых данных; датчик углового положения антенны; вычислитель аппроксимирующих сплайнов; вычислитель координат ближних узлов; устройство решения уравнения пеленгации. Сигнал с выхода пеленгационного приемника β_{A-O} , соответствующий угловому отклонению $\beta_{ист}$ радиолокационного объекта от оптической оси пеленгационной антенны, подается на вход устройства решения уравнения пеленгации, а с его выхода снимается измеренное значение углового отклонения $\beta_{изм}$ радиолокационного объекта, откорректированное в пеленгаторе с помощью специальных алгоритмов обработки информации в бортовом компьютере.

В аналитическом виде уравнение пеленгации имеет вид:

$$\beta_{A-O}\{\beta = \beta_{ист}[\alpha_x, \alpha_y]\} - C_{0A-O}[\alpha_x, \alpha_y] - C_{1A-O}[\alpha_x, \alpha_y]\beta_{изм} - C_{2A-O}[\alpha_x, \alpha_y]\beta_{изм}^2 - C_{3A-O}[\alpha_x, \alpha_y]\beta_{изм}^3 \dots - C_{nA-O}[\alpha_x, \alpha_y]\beta_{изм}^n = 0. \quad (3)$$

Для решения задачи пеленгации на входы устройства решения уравнения пеленгации должны непрерывно подаваться значения $(n + 1)$ коэффициентов разложения ПХ системы А–О. Все поле возможных значений углов поворота пеленгационной антенны α_x, α_y в обтекателе разбивается в выбранной системе координат (декартовой или полярной) на сектора. Точка в месте сопряжения смежных секторов называется узлом и определяется координатами узла. Каждому узлу с координатами α_{xi}, α_{yk} соответствуют два семейства значений коэффициентов разложения ПХ по соответствующим координатам плоскостей пеленгации. Совокупность значений:

$$\left\{ \alpha_{xi}, \alpha_{yk} \left[\left(C_{xik0A-O}, C_{xik1A-O}, \dots, C_{xiknA-O} \right), \left(C_{yik0A-O}, C_{yik1A-O}, \dots, C_{yiknA-O} \right) \right] \right\}$$

представляет собой узловые данные. В устройстве хранения узловых данных размещается массив семейств узловых данных, соответствующих различным рабочим значениям параметров пеленгации (см. рис. 2). Для подачи текущих значений коэффициентов ПХ системы А–О на входы устройства решения уравнения пеленгации необходимо предварительно провести аппроксимацию сплайновыми функциями уз-

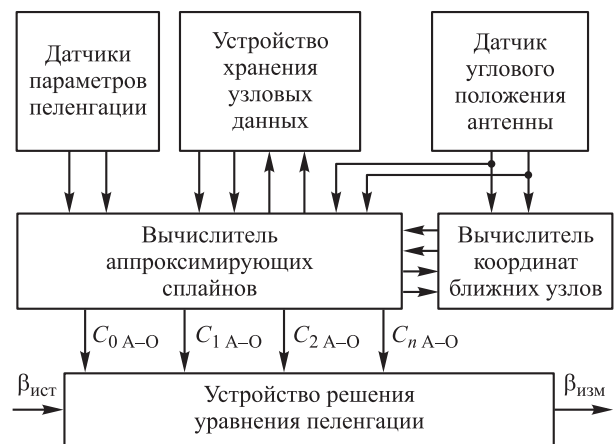


Рис. 2. Блок-схема пеленгатора n -го порядка

ловых данных, расположенных в ближних узловых точках, находящихся в окрестности текущих значений параметров α_x, α_y . Для этого в блок-схему пеленгатора вводятся вычислитель координат ближних узлов и вычислитель аппроксимирующих сплайнов (см. рис. 2).

Для обоснованного выбора оптимального метода аппроксимации узловых данных рассмотрим одномерную задачу подготовки и передачи данных о значениях коэффициента C_{x0A-O} . Ее решение должно удовлетворять противоречивым требованиям: с одной стороны, дискретный массив данных о значениях C_{x0A-O} не должен быть слишком большим, чтобы не занимать большой объем долговременной памяти в устройстве хранения узловых данных (см. рис. 2), с другой – он должен быть достаточным для обеспечения требуемой точности пеленгации. Простейшим случаем аппроксимации данных о коэффициенте C_{x0A-O} является применение сплайнов нулевого порядка (на каждом участке степень полинома равна нулю), при котором значение в каждой промежуточной точке принимается равным ближайшему значению, заданному в таблице.

В результате данные представляются ступенчатой функцией, а само приближение называется интерполяцией по соседним точкам. Погрешность аппроксимации в этом случае будет составлять $M_1 h$, где $M_1 = \max |C_{x0A-O}'(\alpha_x)|$; h – угловое расстояние между двумя смежными узловыми точками.

Другой метод аппроксимации – линейная интерполяция – основан на соединении соседних точек отрезками прямых, при этом табличные данные представляются ломаной линией (сплайн 1-го порядка дефекта единица). В этом случае погрешность представления функции составит:

$$\frac{M_2 h^2}{8},$$

где $M_2 = \max |C_{x0A-O}''(\alpha_x)|$.

Для еще более точной аппроксимации исходных данных можно применить гладкие функции в виде интерполяции кубическими сплайнами [8].

На рис. 3 в качестве примера приведены абсолютные погрешности различных методов аппроксимации зависимости пеленгационных ошибок для типичной системы А–О [9]. Видно, что аппроксимация исходных данных ступенчатой функцией (сплайном 0-го порядка) имеет наихудшую точность. Абсолютная погрешность при линейной аппроксимации уменьшается более чем на порядок. Еще большая точность достигается при аппроксимации кубическими сплайнами.

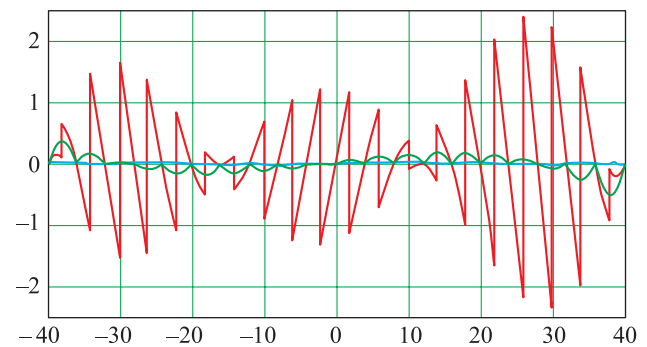


Рис. 3. Абсолютные погрешности различных методов аппроксимации:

— ступенчатая функция (сплайны нулевого порядка); — линейная интерполяция (сплайны 1-го порядка); — интерполяция кубическими сплайнами

Перейдем к анализу различных представлений функций коэффициентов разложения ПХ в многомерном случае. Для обеспечения общности подхода и простоты анализа обозначим значение аппроксимирующей функции n -го коэффициента разложения $C_{nA-O}[\dots]$, где $n \geq 0$, через Z .

Как известно, через три точки пространства можно провести плоскость, а в случае четырех точек через них можно провести поверхность 2-го порядка, называемую билинейной функцией [8]. Поскольку в процессе функционирования системы А–О меняются значения как минимум двух параметров α_x, α_y , наиболее востребованным для практики является рассмотрение случая с четырьмя узловыми точками, имеющими координаты:

$$\alpha_{xi}, \alpha_{yk}; \alpha_{x(i+1)}, \alpha_{yk}; \alpha_{xi}, \alpha_{y(k+1)}; \alpha_{x(i+1)}, \alpha_{y(k+1)},$$

значения функции, в которых соответственно (рис. 4)

$$Z_{ik}; Z_{(i+1)k}; Z_{i(k+1)}; Z_{(i+1)(k+1)}.$$

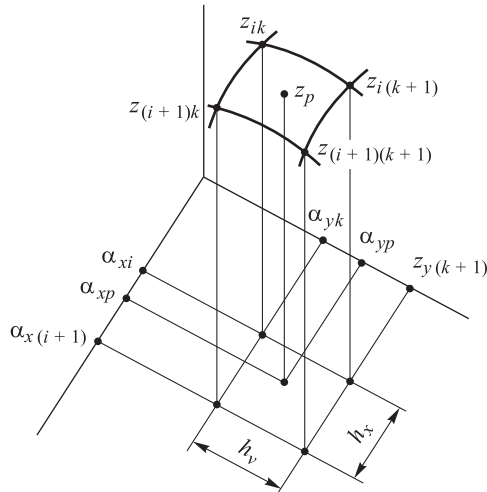


Рис. 4. Аппроксимация билинейной поверхностью с четырьмя узловыми точками

При построении билинейной поверхности текущей точке α_{xp}, α_{yp} , находящейся в четырехугольнике с приведенными выше координатами, будут соответствовать барицентрические координаты u, v , которые можно найти из системы:

$$\begin{cases} (1-v)(1-u)\alpha_{xi} + (1-v)u\alpha_{x(i+1)} + \\ + v(1-u)\alpha_{xp} + vu\alpha_{x(i+1)} = \alpha_{xp}, \\ (1-v)(1-u)\alpha_{yk} + (1-v)u\alpha_{y(k+1)} + \\ + v(1-u)\alpha_{yp} + vu\alpha_{y(k+1)} = \alpha_{yp}. \end{cases} \quad (4)$$

Определив значения u, v из системы (4), можно найти значение функции, соответствующей текущей точке α_{xp}, α_{yp} :

$$Z_p = (1-v)(1-u)Z_{ik} + (1-v)uZ_{(i+1)k} + v(1-u)Z_{i(k+1)} + vuZ_{(i+1)(k+1)}. \quad (5)$$

В случае прямоугольной сетки

$$\alpha_{xi} = \alpha_{x0} + ih_x, \quad \alpha_{yk} = \alpha_{y0} + kh_y,$$

где α_{x0}, α_{y0} – начальные значения границ диапазона.

Условие попадания текущей точки $(\alpha_{xp}, \alpha_{yp})$ в прямоугольник $(\alpha_{xi}, \alpha_{yk}); (\alpha_{x(i+1)}, \alpha_{y(k+1)}); (\alpha_{xi}, \alpha_{y(k+1)}); (\alpha_{x(i+1)}, \alpha_{y(k+1)})$ имеет вид:

$$\begin{cases} (\alpha_{x0} + ih_x) \leq \alpha_{xp} < [\alpha_{x0} + (i+1)h_x], \\ (\alpha_{y0} + kh_y) \leq \alpha_{yp} < [\alpha_{y0} + (k+1)h_y], \end{cases} \quad (6)$$

откуда

$$i = \left[\frac{\alpha_{xp} - \alpha_{x0}}{h_x} \right], \quad k = \left[\frac{\alpha_{yp} - \alpha_{y0}}{h_y} \right].$$

Здесь h_x, h_y – значения шагов аппроксимации или расстояния между соседними узловыми точками по координатам α_{xp} и α_{yp} ;

$[\alpha_{xp}]$ – целая часть α_{xp} .

Аналитические соотношения (6) могут быть использованы для разработки алгоритмов вычисления координат ближних узлов, расположенных в окрестности текущей точки $(\alpha_{xp}, \alpha_{yp})$.

В общем случае билинейную поверхность можно обобщить на четырехугольники, образованные кривыми. Соответствующая поверхность называется поверхностью Кунса и может быть использована, например, в случае снятия данных о характеристиках системы А–О не в декартовой, а в полярной системе координат. Выбор сплайновой функции при аппроксимации данных представляет собой решение задачи оптимизации в части удовлетворения требований по обеспечению допустимых погрешностей аппроксимации при максимальных абсолютных значениях шагов h_x, h_y , соответствующих минимальному количеству элементов в матрицах компенсирующих массивов.

В общем виде алгоритм пеленгации можно представить в виде последовательности выполнения следующих операций. Во-первых, измерение текущего углового положения пеленгационной антенны α_{xp}, α_{yp} в системе А–О путем считывания показаний соответствующих датчиков углового положения пеленгационной антенны относительно обтекателя. Во-вторых, определение в соответствии с соотношением (6) координат ближних узловых точек. В-третьих, определение Z_p в текущей точке α_{xp}, α_{yp} на основе (4), (5).

Для двух плоскостей пеленгации в пеленгаторе 1-го порядка в качестве функции Z_p используются значения коэффициентов C_{x0A-O} и C_{y0A-O} . В случае пеленгатора 2-го порядка аналогичный подход используется для нахождения уже двух пар коэффициентов ПХ C_{x0A-O}, C_{x1A-O} и C_{y0A-O}, C_{y1A-O} , соответствующих текущей точке α_{xp}, α_{yp} . В зависимости от требу-

емой точности пеленгации аналогичным образом определяются $n + 1$ коэффициентов разложения ПХ для плоскости пеленгации X ($C_{x0A-O}, C_{x1A-O}, \dots, C_{xnA-O}$) и для плоскости пеленгации Y ($C_{y0A-O}, C_{y1A-O}, \dots, C_{ynA-O}$) с последующей реализацией алгоритмов обработки сигналов в соответствии с блок-схемой на рис. 2.

Разработка критериев оценки точности интерполяции и сравнительный анализ погрешностей компенсации

Для более детального анализа и количественной оценки погрешностей компенсации предлагается использовать математические модели пеленгационных ошибок, которые как по абсолютным значениям, так и по характеру изменения функций близки к характеристикам реальных систем А–О.

Возможность определения функции в любой точке с любой заданной точностью с помощью аналитических соотношений позволяет проводить сравнительный анализ методических погрешностей пеленгаторов любого порядка при различных алгоритмах аппроксимации исходных данных. Кроме этого, полученные на базе этих математических моделей тестовые узловые данные позволяют упростить настройку, проверку работоспособности и корректности функционирования бортовых РЛС с компенсацией. В качестве одной из таких математических моделей использовалась аналитическая функция вида:

$$\Delta\alpha = \sin\left(\frac{2\pi}{L}|\mathbf{r}|\right), \quad (7)$$

где $\Delta\alpha$ – пеленгационная ошибка системы А–О;
 L – параметр, определяющий количество максимумов и минимумов функции в полярном сечении эталонной модели (выбирается на основе анализа экспериментальных данных).

\mathbf{r} – радиус-вектор, проведенный из начала декартовой системы координат в точку α_{xp} , α_{yp} ($\alpha_{xp} = r \sin\varphi$; $\alpha_{yp} = r \cos\varphi$; φ – угол поворота плоскости сечения модели в полярной системе координат);

Образец эталонной модели приведен на рис. 5.

Математические ресурсы системы *MATLAB* позволяют достаточно просто формировать из

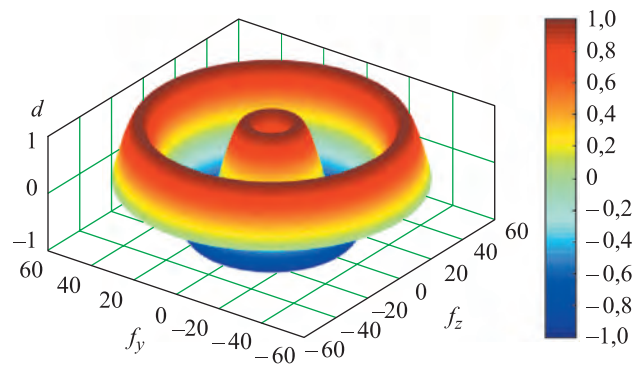


Рис. 5. Эталонная модель

эталонной модели практически любое количество полярных сечений с любым значением интервала выборки между узловыми точками, а также компенсационные массивы в декартовой (азимутально-угломестной) системе координат с любыми значениями расстояний между узловыми точками. Система *MATLAB* также позволяет использовать различные методы аппроксимации, в частности наиболее широко применяемые линейную и кубическую интерполяции.

Есть инструмент, позволяющий разработать способы формирования оптимальных компенсационных массивов, базирующийся на количественной оценке погрешностей компенсации для случаев, соответствующих различным расстояниям между узловыми точками и количеству сечений. При этом под термином оптимальный компенсационный массив будем иметь в виду массив, удовлетворяющий критерию минимизации количества узловых данных при обеспечении заданной погрешности аппроксимации.

Для сравнительного анализа точности разных методов аппроксимации было введено понятие «разностной матрицы», элементы которой представляют собой абсолютные погрешности аппроксимации в виде разностей между интерполированными и истинными значениями функции. Количественная оценка погрешностей интерполяции, соответствующих полярной и декартовой системы координат, осуществлялась путем формирования тестовых массивов по 12 полярным сечениям указанной эталонной модели. Узловые данные для этих полярных сечений взяты с шагом $h_r = 1^\circ$. Общее количество узловых точек при



диапазоне изменения r в пределах $0 \dots \pm 60^\circ$ составит $n_{yp} = 121 \times 12 = 1452$.

Для корректности сравнительного анализа точности аппроксимации пеленгационных ошибок системы А–О по дискретным массивам был применен следующий прием. Для функции, приведенной на рис. 5, все поле значений аргумента было разбито квадратной сеткой в декартовой системе координат с шагом $h_x = h_y = 3^\circ$. При таком разбиении количество узловых точек $n_{yD} = 1681$, что близко к приведенному выше значению $n_{yp} = 1452$, для полярной системы координат. На рис. 6, а и рис. 6, б приведены разностные матрицы абсолютных погрешностей аппроксимации для 12 сечений в полярной системе координат соответственно для линейной и кубической интерполяции. На рис. 7, а и рис. 7, б приведены абсолютные погрешности в декартовой системе координат для 1681 узловой точки для линейной и кубической интерполяции соответственно.

Анализ разностных матриц при линейной (рис. 6, а; 7, а) и кубической (рис. 6, б; 7, б) интерполяциях показывает, что применение кубической интерполяции позволяет в среднем в 5 раз уменьшить значения абсолютных погрешностей при полярном представлении данных и приблизительно в 2 раза – значения абсолютных погрешностей интерполяции при представлении данных в декартовой системе координат.

Отметим специфическую особенность интерполяции в декартовой системе координат, для которой свойственно наличие узких выбросов абсолютных погрешностей в начале системы в области экстремума эталонной

функции. В свою очередь, интерполяция данных в полярной системе координат приводит к росту абсолютных погрешностей по мере удаления от начала системы, что физически можно объяснить расхождением радиальных лучей полярных сечений, вдоль которых располагаются узловые точки.

Расчеты показали, что уменьшение шага $h_{x,yD}$ с 6° до $1,5^\circ$ в декартовой системе координат приводит к пропорциональному уменьшению абсолютных погрешностей аппроксимации, что вполне объясняется тем обстоятельством, что узловые точки расположены равномерно на всем поле возможных значений аргумента и увеличение их количества приводит к более точной передаче детальной информации об эталонной модели.

Изменение шага h_{rp} с 6° до 3° в полярной системе координат также приводит к пропорциональному уменьшению в 2 раза абсолютных погрешностей интерполяции. Однако при дальнейшем уменьшении шага до значения $h_{rp} = 1^\circ$ для выбранной эталонной модели уменьшение абсолютных погрешностей интерполяции практически не происходит. Это можно объяснить тем, что для выбранной эталонной модели увеличение количества узловых точек, расположенных вдоль радиальных лучей, практически не добавляет полезной информации для аппроксимации данных.

Исходя из физических соображений, уменьшения абсолютных погрешностей аппроксимации в полярной системе координат можно было бы добиться в этом случае лишь увеличением количества полярных сечений.

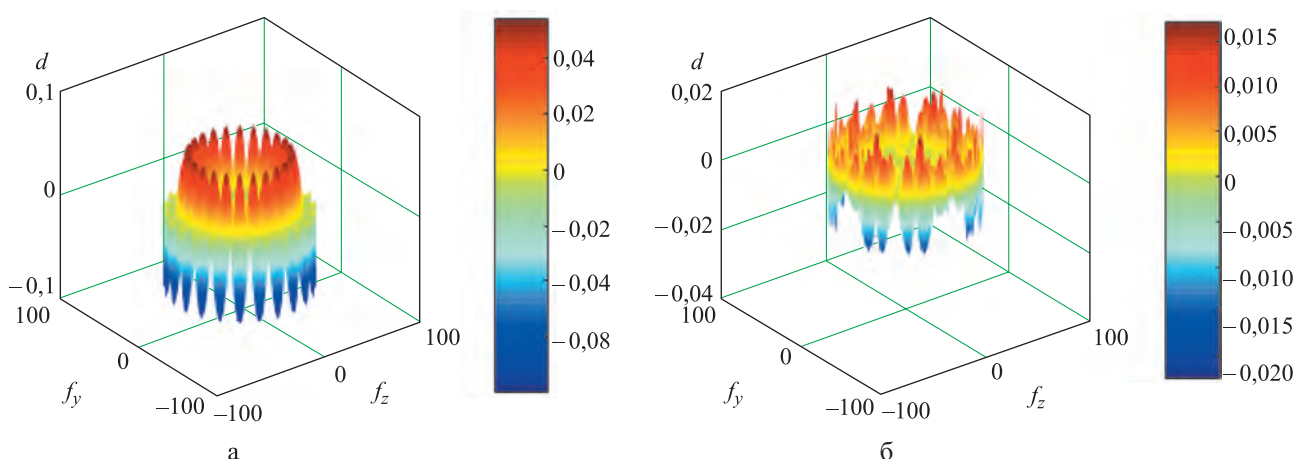


Рис. 6. Разностная матрица в полярной системе координат для линейной (а) и кубической (б) интерполяции

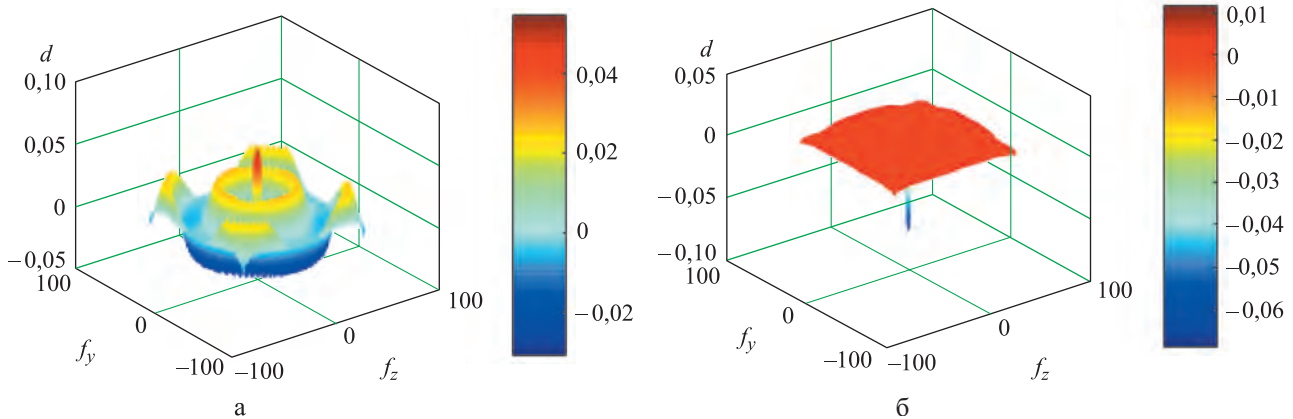


Рис. 7. Разностная матрица в декартовой системе координат для линейной (а) и кубической (б) интерполяции

Увеличение количества полярных сечений до 18, т. е. всего в 1,5 раза при неизменном шаге, как показали расчеты, приводит к уменьшению абсолютных погрешностей в 2,5 раза. Это можно объяснить увеличением информативности данных об эталонной модели, подлежащих интерполяции.

Заключение

Рассмотрены возможности увеличения точности и устойчивости сопровождения бортовыми РЛС сверхскоростных высокоманевренных воздушных целей путем учета n коэффициентов разложения реальной ПХ системы «антенна – обтекатель». Дискретный массив этих коэффициентов, полученный в результате экспериментальных измерений, используется для восстановления значений коэффициентов в текущей точке пространства и решения уравнения пеленгации.

Разработаны и апробированы оптимальные алгоритмы обработки информации для обеспечения всего цикла компенсации пеленгационных ошибок систем «антенна – обтекатель», включая экспериментальное измерение исходных данных, последующую их фильтрацию и формирование компенсационных массивов, а также обработку сигналов в бортовом компьютере.

На основе предложенной математической модели пеленгационных ошибок системы «антенна – обтекатель» с использованием разностных матриц проведен анализ точности разных методов восстановления данных. Показано, что применение кубической интерполяции при сравнимом количестве узловых

данных позволяет по сравнению с линейной интерполяцией уменьшить в среднем в 5 раз значения абсолютных погрешностей при полярном представлении данных и приблизительно в 2 раза – при представлении данных в декартовой системе координат.

Увеличение узловых точек в декартовой системе координат ведет к пропорциональному повышению точности компенсации, а применение компенсации в полярной системе координат при увеличении количества полярных сечений от 12 до 18, т. е. всего в 1,5 раза, при неизменном шаге между узловыми точками позволяет уменьшить абсолютные погрешности компенсации в 2,5 раза.

Практическое применение предложенных методов и алгоритмов обработки информации, полученной с помощью систем «антенна – обтекатель», позволяет существенно повысить точность пеленгации и обосновать выбор оптимальных параметров аппаратурной компенсации пеленгационных ошибок, исходя из требований к погрешности пеленгации и ресурсам бортового компьютера.

Список литературы

1. Столбовой В. С., Турко Л. С., Залётин П. В. Пеленгационная характеристика системы «антенна – обтекатель» и пути повышения точности пеленгации радиолокационных объектов // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2016. № 1 (16). С. 52–60.
2. Измеритель пеленгационных характеристик систем «антенна-обтекатель»: патент RU2287834 С1/ В. С. Столбовой. Опубл. 20.11.2006, Бюл. № 32. 5 с.



- 3.** Измеритель пеленгационных характеристик системы «антенна – обтекатель»: патент RU 2442181 C1 / *В. С. Столбовой, Л. С. Турко, П. В. Залётин*. № 2010147056/11. Оpubл. 10.02.2012, Бюл. № 4. 5 с.
- 4.** Стенд для измерения электрических параметров обтекателей антенн: патент № 202245 / *Л. В. Поздняков, И. С. Каравчук, Л. Н. Яковлев*. Оpubл. 14.09.1967, Бюл. № 19. 3 с.
- 5.** Стенд для проверки обтекателей: патент № 261485 / *Л. И. Ефименко* и др. Оpubл. 01.01.1970, Бюл. № 5. 4 с.
- 6.** Устройство сопровождения с компенсацией пеленгационных ошибок системы «антенна – обтекатель»: пат. RU 2284534 C1 / *В. П. Берсенева*, *В. А. Сосновский, В. С. Столбовой, А. М. Сухов* № 2005112399/09. Оpubл. 27.09.2006, Бюл. № 27. 6 с.
- 7.** Устройство пеленгации и сопровождения с компенсацией искажений пеленгационной характеристики системы «антенна – обтекатель»: патент RU 2563625 C1 / *В. С. Столбовой, Л. С. Турко, П. В. Залётин*. Оpubл. 20.09.2015. Бюл. № 26.
- 8.** *Голованов Н. Н.* Геометрическое моделирование. М: Физматлит, 2002. 472 с.
- 9.** *Каплун В. А.* Обтекатели антенн СВЧ. Радиотехнический расчет и проектирование. М.: Советское радио, 1974. 240 с.
- Поступила 23.11.16**

Столбовой Валерий Стефанович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории АО «Московский научно-исследовательский институт «Агат» (АО «МНИИ Агат»), г. Москва.
Область научных интересов: разработка и радиотехнические испытания систем «антенна – обтекатель».

Турко Леонид Степанович – начальник отделения АО «МНИИ «Агат», г. Москва.
Область научных интересов: разработка антенн и обтекателей, а также методов их расчета и испытаний.

Залётин Павел Владимирович – инженер АО «МНИИ «Агат», г. Москва.
Область научных интересов: разработка и радиотехнические испытания систем «антенна – обтекатель».

Knoware and hardware of boresight error compensation in «antenna – radome systems»

We consider solutions to improve the bearing and tracking accuracy of on-board radar objects by radars with “antenna – radome” systems. We developed algorithms for instrumental boresight error compensation according to the nodal data. We propose a method of forming the nodal data using the results of experimental measurements performed with the help of automated systems. Moreover, we give practical recommendations for the method implementation. On the basis of the difference matrices we developed a design procedure for errors in presenting the data by different methods and obtained analytical relations for the informed choice of the form of compensating arrays.

Keywords: “antenna – radome” system, boresight error compensation, information handling optimal algorithms, bearing accuracy, on-board radar.

Stolbovoy Valery Stefanovich – Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Officer, head of laboratory of Joint stock Company Moscow Research Institute Agat, Moscow.
Science research interests: development and testing of “antenna – radome” systems.

Turko Leonid Stepanovich – Head of department of Joint stock Company Moscow Research Institute Agat, Moscow.
Science research interests: development of antennas and radomes and methods for their calculation and testing.

Zaletin Pavel Vladimirovich – Engineer of Joint stock Company Moscow Research Institute Agat, Moscow.
Science research interests: development and testing of “antenna – radome” systems.