

Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Фёдоров С.М., Ищенко Е.А.

УЛУЧШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПЕЛЕНГАТОРА БЕСПИЛОТНОГО ВЕРТОЛЕТА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Аннотация. Данная работа посвящена изучению возможности применения аппарата теории «виртуальных» антенных решеток (ВАР) для уменьшения погрешности пеленгования. Рассматриваемый случай относится к пеленгатору, который установлен на беспилотном вертолете (БПЛА). Анализ производится в наиболее проблемной резонансной области рассеяния волн на анализируемом электродинамическом объекте. По полученным данным сделаны выводы о перспективности применения аппарата ВАР для повышения точности пеленгования.

Ключевые слова: радиопеленгация, «виртуальная» антенная решетка, аппроксимация поля, экстраполяция поля, БПЛА, антенная решетка.

Abstract. This work is devoted to studying the possibility of applying the theory of "virtual" antenna arrays (VAR) to reduce the direction finder error. The case under consideration refers to the direction finder, which is mounted on an unmanned helicopter (UAV). The analysis is performed in the most problematic resonance region of wave scattering on the analyzed electrodynamic object. Based on the data obtained, conclusions are drawn about the prospects of using the VAR apparatus to improve direction finding accuracy.

Keywords: radio direction finding, "virtual" antenna array, field approximation, field extrapolation, UAV, antenna array.

Введение

Известны публикации [1-6], которые посвящены улучшению характеристик пеленгования с использованием аппарата «виртуальных» решеток (в литературе встречаются термины «virtual array» [1,2,5,6]; «virtual antenna array» [3]; «virtual uniform linear array (VULA)» [4]). В данных работах показано, что применение ВАР позволяет улучшить точность обнаружения объектов, при заданном значении параметра отношение сигнал-шум (SNR), что достигается благодаря формированию дополнительных «виртуальных» антенных элементов. При этом рассматриваются различные варианты расположения антенных элементов: – 1) по линии с равными расстояниями [1,2,5]; 2) по окружности [3]; 3) с неравномерным распределением элементов [4].

Однако, приведённые выше способы формирования ВАР имеют определенные недостатки. Так, в каждой из статей предлагаются математические модели, которые требуют построения больших матриц и использования большого числа отсчетов. Особую трудность представляет

выбор математического алгоритма интерполяции поля для каждого типа приходящего сигнала.

Целью данной работы является исследование возможности использования ВАР, требующей небольших вычислительных мощностей и не нуждающейся в априорной информации об близлежащих рассеивателях, для повышения точности пеленгования для комплекса, установленного на БПЛА.

Исследование влияния ВАР на точность пеленгования

Значительная часть конструкции беспилотного вертолета выполнена из диэлектрических композитных материалов, включая винты. Из металлических деталей вертолета максимальные габаритные размеры имеют двигатель и продольная мачта (длина которой около 1.5 м).

На летательном аппарате была установлена антенная система пеленгатора, состоящая из двух кольцевых антенных решеток с радиусами 210 мм и 300 мм; расположенных на одной оси на расстоянии 300 мм друг от друга. Каждая подрешетка состоит из 5 биконических вибраторов с полной высотой 75 мм и диаметром основания 42 мм. Вибраторы верхней и нижней подрешеток расположены в шахматном порядке.

Вибраторы были нагружены на усилители высокой частоты характеризуются эквивалентной схемой в виде последовательного соединения резисторов 100 Ом и конденсаторов 1.5 пФ (на частоте 100 МГц модуль сопротивления нагрузки – около 1000 Ом; на частоте 3000 МГц модуль сопротивления нагрузки – около 100 Ом).

В ходе исследований было выяснено, что продольная металлическая мачта оказывает существенное влияние на точность измеряемых угловых координат; особенно негативное влияние оказывают волны, рассеянные мачтой, на точность измерения угла места.

Одним из способов снижения систематической погрешности пеленгования предложено использовать аппарат теории ВАР, в частности – интерполяцию распределения электромагнитного поля на окружностях расположения фазовых центров двух кольцевых подрешеток антенной системы. Так как геометрия основного рассеивателя (продольной мачты) известна, было предложено представить поле, рассеянное мачтой, в виде суперпозиции полей блестящих точек, расположенных на мачте, рис. 1, 2.

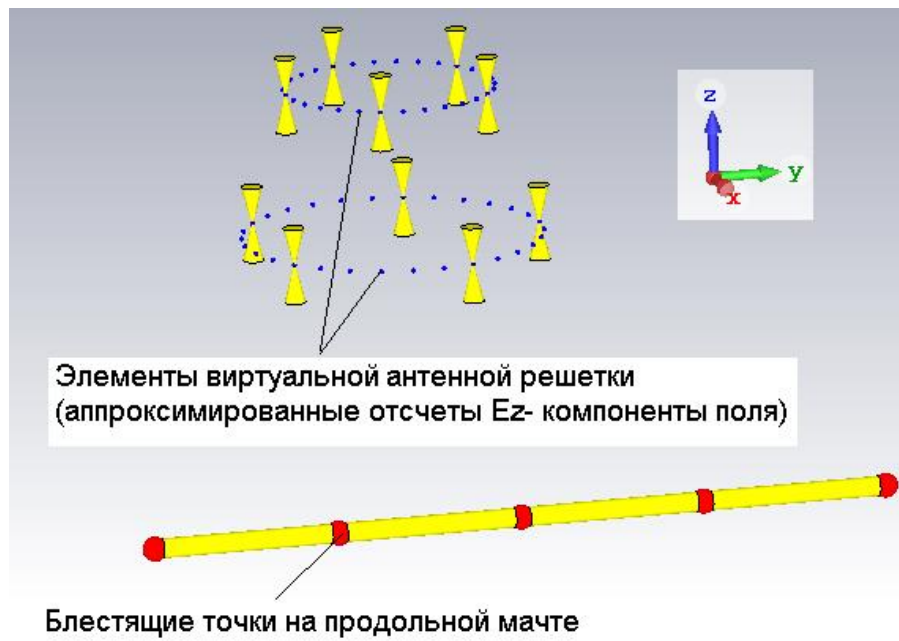


Рисунок 1 – Модель антенной решетки и рассеивателя (беспилотный вертолет)

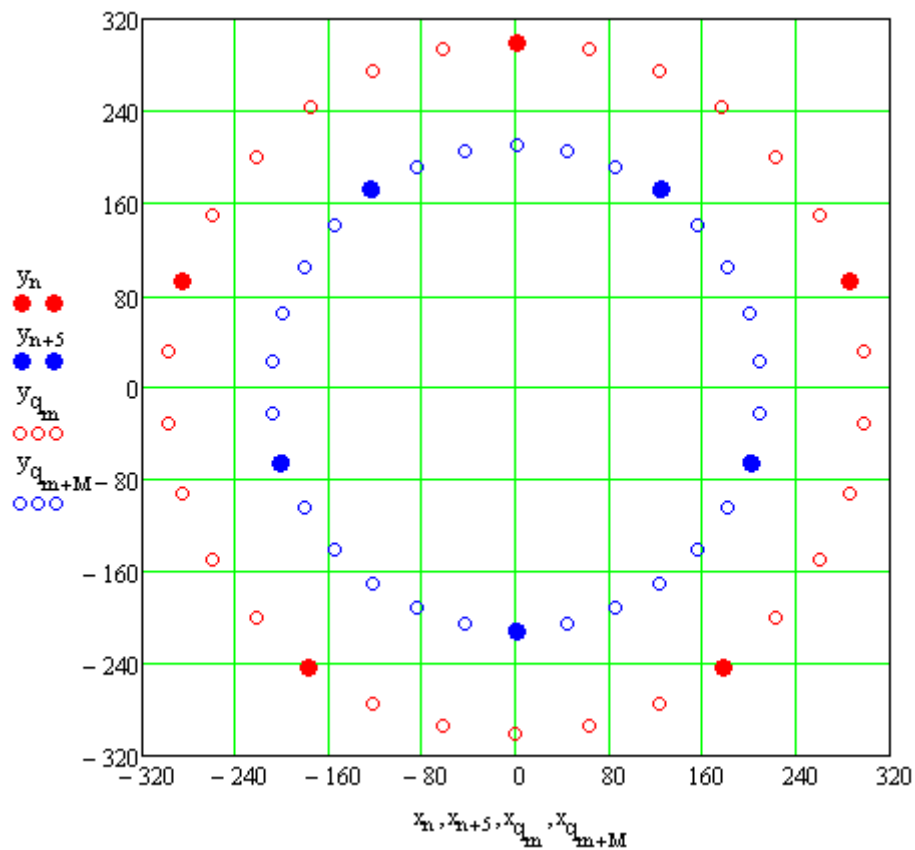


Рисунок 2 – Расположение реальных (залитые кружки) и виртуальных (кружки без заливки) антенных элементов, вид сверху

Виртуальные антенные элементы формировались для того, чтобы была возможность использовать большее количество блестящих точек на корпусе рассеивателя.

Для большей точности аппроксимации поля в ходе формирования виртуальной антенной решетки, виртуальные антенные элементы формировались на тех же окружностях, на которых расположены реальные антенные элементы.

Использовалось предположение, что наблюдаемое электромагнитное поле является суперпозицией падающей плоской волны и M сферических волн (1):

$$U_n^\Sigma = U_n^{nad} \cdot \exp\left(ik_0(x_n \cos(\varphi)\sin(\theta) + y_n \sin(\varphi)\sin(\theta) + z_n \cos(\theta))\right) + \sum_{m=1}^M U_m^{pacc} \cdot \frac{\exp\left(-ik_0\sqrt{(x_n - X_m)^2 + (y_n - Y_m)^2 + (z_n - Z_m)^2}\right)}{\sqrt{(x_n - X_m)^2 + (y_n - Y_m)^2 + (z_n - Z_m)^2}},$$

$$n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где U_n^Σ – амплитуда напряженности поля в комплексной форме в месте расположения (x_n, y_n, z_n) виртуального антенного элемента с соответствующим номером $n = 1, \dots, N$; U^{nad} – комплексная амплитуда напряженности поля, наведенного на вибраторах плоской волной, приходящей с направления (φ, θ) ; k_0 – волновое число; U_m^{pacc} – комплексная амплитуда m -го точечного источника сферической волны (M точечных источников волн с координатами X_m, Y_m, Z_m моделируют поле, рассеянное носителем антенной решетки).

Для нахождения комплексных амплитуд U_n^Σ использовалась следующая система уравнений:

$$u_k^\Sigma = \sum_{v=1}^V u_v^{вспом} \cdot \frac{\exp\left(-ik_0\sqrt{(x_k^{реал} - x_v^{вспом})^2 + (y_k^{реал} - y_v^{вспом})^2 + (z_k^{реал} - z_v^{вспом})^2}\right)}{\sqrt{(x_k^{реал} - x_v^{вспом})^2 + (y_k^{реал} - y_v^{вспом})^2 + (z_k^{реал} - z_v^{вспом})^2}},$$

$$k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$U_n^\Sigma = \sum_{v=1}^V u_v^{вспом} \cdot \frac{\exp\left(-ik_0\sqrt{(x_n - x_v^{вспом})^2 + (y_n - y_v^{вспом})^2 + (z_n - z_v^{вспом})^2}\right)}{\sqrt{(x_n - x_v^{вспом})^2 + (y_n - y_v^{вспом})^2 + (z_n - z_v^{вспом})^2}},$$

$$n = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где u_k^Σ – комплексная амплитуда напряженности поля в месте расположения $(x_k^{реал}, y_k^{реал}, z_k^{реал})$ реального антенного элемента с номером $k = 1, \dots, K$; $u_v^{вспом}$ –

комплексная амплитуда вспомогательного источника поля с координатами $(x_k^{вспом}, y_k^{вспом}, z_k^{вспом})$, суперпозицией которых ($\nu=1, \dots, V$) моделируется суммарное наблюдаемое поле.

Система уравнений (1) предварительно была разделена на действительную и мнимую части; из левых частей разделенной системы уравнений вычитались правые части, разницы возводились в квадрат и складывались между собой.

Решение разделенной на реальные и мнимые части системы (1) проводилось в пакете Mathcad с помощью процедуры квазирешения Minerr, в которой реализована модификация метода Ньютона решения нелинейной системы уравнений.

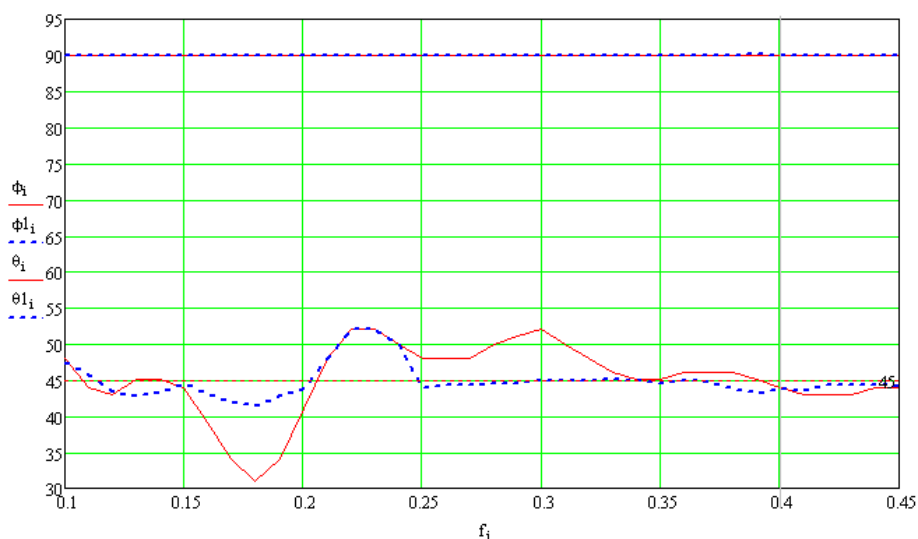
В качестве начального приближения пеленга (φ, θ) использовался пеленг, определенный с помощью традиционного корреляционного интерференционного метода пеленгования.

Численное моделирование проводилось в наиболее проблемной – резонансной области рассеяния волн на анализируемом электродинамическом объекте «антенная решетка – продольная мачта», соответствующей диапазону 0.1-0.45 ГГц. На рис. 3 приведены результаты оценки пеленга для следующих истинных значений его координат: $\varphi = 90$ градусов (плоскость падения волны uOz проходит через продольную ось симметрии мачты); $\theta = 45$ градусов (угол места отсчитывается от оси z).

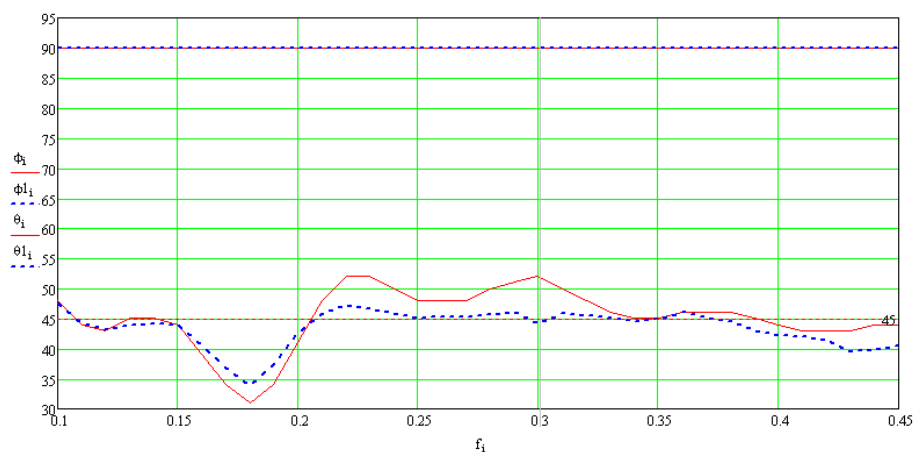
Из рис. 3 видно, что использование предложенного метода позволяет приблизительно в 2 раза уменьшить максимальную и среднеквадратическую погрешность пеленгования в диапазоне частот 0.1-0.45 ГГц.

Лучших результатов удастся достичь при использовании ненулевого начального приближения пеленга (например – значения пеленга, соответствующего классическому интерференционно-корреляционному методу пеленгования при использовании сигналов с выходов элементов «реальной» антенной решетки).

Аппарат формирования виртуальной антенной решетки может использоваться для увеличения числа используемых блестящих точек (в данном случае использовалась реальная АР из 5 + 5 вибраторов; формировалась виртуальная АР из 30 + 30 отсчетов поля; продольная мачта моделировалась в виде 5 блестящих точек).



а) – ненулевое начальное приближение комплексных амплитуд $u_v^{вспом}$



б) – нулевое начальное приближение комплексных амплитуд $u_v^{вспом}$

Рисунок 3 – Измеренные азимут и угол места при классическом интерференционно-корреляционном методе пеленгования [7] (сплошные линии), и при использовании предложенного метода (пунктирные линии)

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что применение ВАР позволяет повысить точность радиопеленгаторной системы, установленной на беспилотном вертолете. Также выяснено, что максимальная точность достигается при использовании ненулевого начального приближения пеленга. Предложенный метод формирования «виртуальной» антенной решетки позволяет снизить среднеквадратичную погрешность.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10109).

Библиографический список

1. Decorrelation Algorithm Based on Virtual Array Extension / Hongliang Duan [and other] // 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (Kunming, Aug 08–10.08, 2012). – Kunming, 2012. – P. 348–351. – URL: <http://www.chinacom.org> (accessed: 01.02.2020).
2. Xiumin Shi. A New Approach to Estimate DOA Using Virtual Interpolation Technique / Xiumin Shi, Yanbing Ju // 9th International Conference on Signal Processing (Beijing, 26–29 October 2008) / Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – 2008. – P. 179–182. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4697098> (accessed: 01.02.2020).
3. Xiaopu Wang. An Accurate Direction-Finding Scheme Using Virtual Antenna Array via Smartphones / Xiaopu Wang, Yan Xiong, Wenchao Huang. – DOI <https://doi.org/10.3390/s16111811> // Sensors. – 2016. – Vol. 16, Is. 11. – P. 1811.
4. Gupta P. Design and analysis of the sparse array for DOA estimation of noncircular signals / P. Gupta, M. Agrawal // IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. – 2018. – Vol. 67, Is. 2. – P. 460–473.
5. DOA Estimation Using Virtual Array Technique for Noncircular Signals / Min Lin, Ling-Ling Cao, Jian Ouyang [et al.] // International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP) (25–27 Oct. 2012). – Huangshan, 2012. – P. 1–5.
6. Seongwook Lee Logarithmic-Domain Array Interpolation for Improved Direction of Arrival Estimation in Automotive Radars / Seongwook Lee, Seong-Cheol Kim // MDPI : Publisher of Open Access Journals. – 2019. – P. 21. – URL: <https://doi.org/10.3390/s19102410> (accessed: 02.04.2020).
7. Radio Monitoring. Problems, Methods, and Equipment / A. M. Rembovsky, A. V. Ashikhmin, V. A. Kozmin, S. M. Smolskiy. – New York : Springer, 2009. – 507 p.