

УДК 621.396.67.012.12

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АДАПТИВНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ НАВОДИМОЙ ПОМЕХИ

Калибачук А.О., оператор роты (научной)
Научный руководитель: Фёдоров П.Н., к.т.н., СИС НИО – 4 НИЦ
Военная академия связи
г. Санкт-Петербург

В современных системах радиосвязи и радиолокации крайне необходимо эффективное подавление помех, что приводит к улучшению качества сигнала и связи. Эта ключевая задача особенно актуальна для осуществления связи с беспилотными летательными аппаратами в условиях трудной сигнально-помеховой обстановки. Адаптивные антенные решётки [1] представляют из себя мощный инструмент для достижения этой цели, так как использование нескольких антенных элементов вместо одного позволяет не просто увеличить уровень принимаемого (передаваемого) сигнала, но и переформировать диаграмму направленности антенной решётки таким образом, чтобы ослаблять сигналы, принимаемые с определённого заданного направления [2].

В данной статье будет рассмотрена методика формирования диаграммы направленности адаптивной антенной решётки в программном обеспечении МАТАВ R2023a. В качестве основы алгоритма построения диаграммы направленности будет использован аналитический метод, который позволяет сформировать “нули” диаграммы направленности за одну итерацию расчётов [3]. Это позволяет адаптивным антенным решёткам эффективно подавлять помехи и, как следствие, улучшать качество принимаемого сигнала.

В качестве объекта исследования будет рассмотрена адаптивная антенная решётка, состоящая из 4-х штыревых антенных элементов, расположенных в одной плоскости по “квадрату” со стороной квадрата d , равной половине длины волны радиочастоты 2,4 ГГц, т.е. равной 62,46 мм.

Для формирования диаграммы направленности используется метод смещения фазы принимаемых сигналов [4]. На каждом антенном элементе индивидуально настраивается сдвиг фазы. После смещения фазы все сигналы суммируются и формируется итоговый сигнал, считываемый приёмником.

В данной работе будем считать, что направление на источник помехи относительно оси антенной решётки известно. Тогда при помощи аналитического метода можно сформировать сдвиги фаз антенных элементов таким образом, чтобы “ноль” диаграммы направленности был сформирован в точности на источник помехи.

На рисунке 1 показана схема размещения антенных элементов. Одним из способов сформировать “ноль” диаграммы направленности в определённом

направлении является формирование такого смещения фазы, чтобы сигналы с двух антенн оказались синфазны друг с другом, а с других двух антенн были в противофазе указанным ранее синфазным сигналам. Таким образом при сумме 4-х сигналов итоговый принятый сигнал будет равен нулю, если не учитывать неточности и наводимые в системе шумы.

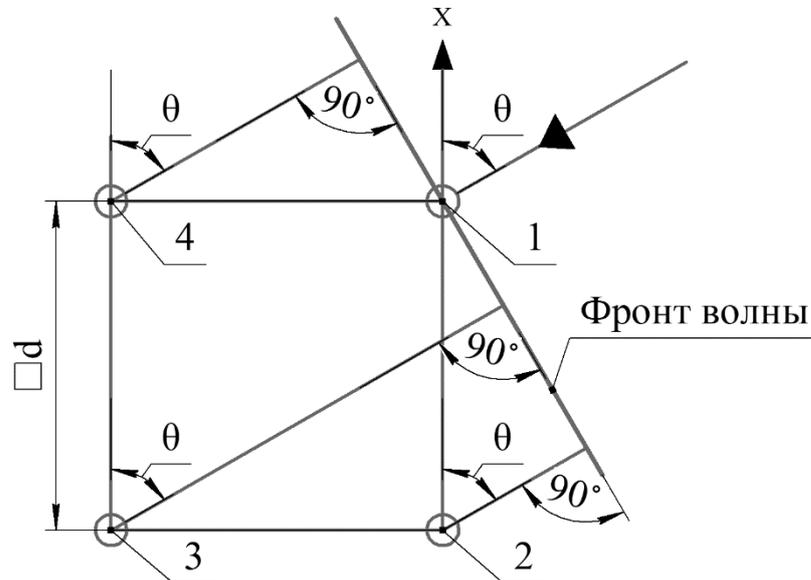


Рис. 1 – схема расположения штыревых антенных элементов

В каждый момент времени амплитуду сигнала на i -ом антенном элементе можно описать по формуле (1):

$$a_i = A_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где A_0 – максимальная амплитуда принимаемого сигнала, ω – круговая частота принимаемого сигнала.

Примем следующее правило, для формирования “нуля” диаграммы направленности: сдвиг фаз будем формировать таким образом, чтобы сигнала с антенных элементов 1 и 4 были синфазны друг другу и были в противофазе сигналам на антенных элементах 2 и 3.

Выберем 1-ый антенный элемент в качестве исходного, т.е. его фаза не будет изменяться. Исходя из геометрической схемы расположения антенных элементов, приведённой на рисунке 1, и принятого выше правила получим следующие формулы (2) для сдвигов фаз антенных элементов 2 – 4.

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{12} = \frac{2\pi d \cdot \cos(\theta)}{\lambda} + \pi; \\ \Delta\varphi_{13} = \frac{2\pi d \cdot \cos(\theta) \cdot (1 + \operatorname{tg}(\theta))}{\lambda} + \pi; \\ \Delta\varphi_{14} = \frac{2\pi d \cdot \sin(\theta)}{\lambda}. \end{cases} \quad (2)$$

Для визуализации работы этого алгоритма используем программное обеспечение MATLAB R2023a. Для построения графических элементов будем использовать функцию figure [5]. Положим, что амплитуда наводимой помехи

в 3 раза превышает уровень сигнала, т.е. имитируется ситуация наведения помехи средствами радиоэлектронной борьбы, мощность которых может превышать уровень сигнала, особенно когда БПЛА находится на большом удалении от источника сигнала. Тогда для реализации алгоритма используем следующие исходные данные, которые приведены в коде программы:

```
%% Consts
ANTENNA_COUNT = 4; % number of linear antenna elements
WAVE_FREQUENCY = 2.4 * 1e9; % wave frequency 2.4 GHz
C = 299792458; % m/s
WAVE_LENGTH = C/WAVE_FREQUENCY; % wave length
ANTENNA_PERIOD = 0.06246; % m
SIGNAL_AMPLITUDE = 1;
NOISE_AMPLITUDE = 3;
```

Далее необходимо задать направление, с которого будет рассматриваться приход помехи и массивы нулей, которые в ходе работы программы будут заполняться данными:

```
%% Antenna pattern. Square antenna. Minimum direction control
Tetta = 221; % degrees, noise direction
j = Tetta;
A0 = 1; % reference amplitude
Amplitude = zeros(ANTENNA_COUNT, 361);
Amplitude_Sum = 0;
Antenna_diagram = zeros(1,361);
SINR = zeros(361,361); % Signal Interference + Noise Ratio
Signal_Amplitude_Diagram = zeros(361,361);
Noise_Amplitude_Diagram = zeros(361,361);
```

После чего имеются все исходные данные, необходимые для построения диаграммы направленности антенной решётки. Согласно системе уравнений (2) получим следующий код, для построения диаграммы направленности:

```
%% 1, 4 - positive phase; 2, 3 - negative phase
for i = 0:360
    Amplitude(1,i+1) = A0;
    Amplitude(2,i+1) = A0 * cos( (2 * pi * ANTENNA_PERIOD / WAVE_LENGTH) * ...
        (cos(deg2rad(i)) - cos(deg2rad(Tetta))) + pi + 2*pi );
    Amplitude(3,i+1) = A0 * cos( (2 * pi * ANTENNA_PERIOD / WAVE_LENGTH) * ...
        (cos(deg2rad(i)) * (1 + tan(deg2rad(i))) - cos(deg2rad(Tetta)) ...
            * (1 + tan(deg2rad(Tetta)))) + pi + 2*pi );
    Amplitude(4,i+1) = A0 * cos( (2 * pi * ANTENNA_PERIOD / WAVE_LENGTH) * ...
        (sin(deg2rad(i)) - sin(deg2rad(Tetta))) + 2*pi );
    Amplitude_Sum = Amplitude_Sum + Amplitude(1,i+1) + Amplitude(2,i+1) + ...
        Amplitude(3,i+1) + Amplitude(4,i+1);
    Antenna_diagram(i+1) = abs((Amplitude_Sum) / (A0 * ANTENNA_COUNT));
    Amplitude_Sum = 0;
end
subplot(1,2,1)
Ang_grid_deg = (0:1:360);
polarplot(deg2rad(Ang_grid_deg), Antenna_diagram);
rlim([0 1.2])
title('Диаграмма направленности адаптивной антенной решетки');
hold on
polarplot([deg2rad(Tetta), deg2rad(Tetta)], [0, 1.2], 'r', 'LineWidth', 1)
polarplot([deg2rad(0), deg2rad(0)], [0, 1], 'b', 'LineWidth', 0.5)
polarplot(deg2rad(0), 1.04, "X")
hold off
grid on
```

Для подтверждения эффективности работы рассматриваемого алгоритма формирования диаграммы направленности адаптивной антенной решётки необходимо получить зависимость отношения уровня принятого сигнала к уровню принятой помехи. Для этого зафиксируем направление на помеху, для которого будет сформирована диаграмма направленности, а направление прихода сигнала будет варьироваться от 0 до 359 градусов. Также положим, что уровень сигнала или помехи не ниже, чем наводимый в системе шум, который примем равным 0.01 от амплитуды полезного сигнала. Тогда получим следующий код, для построения диаграммы ОСПШ (отношения сигнала к помехе/шуму):

```
for R = 0:360
    if (NOIZE_AMPLITUDE * Antenna_diagram(j+1)) > 1e-2
        if (SIGNAL_AMPLITUDE * Antenna_diagram(R+1)) > 1e-2
            Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = (SIGNAL_AMPLITUDE * Antenna_dia-
gram(R+1));
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = (NOIZE_AMPLITUDE * Antenna_dia-
gram(j+1));
            SINR(R+1,j+1) = 20 * log( Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) / ...
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) );
        else
            Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = ((1e-3));% * randi([1,10]);
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = (NOIZE_AMPLITUDE * Antenna_dia-
gram(j+1));
            SINR(R+1,j+1) = 20 * log( Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) / ...
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) );
        end
    else
        if (SIGNAL_AMPLITUDE * Antenna_diagram(R+1)) > 1e-2
            Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = (SIGNAL_AMPLITUDE * Antenna_dia-
gram(R+1));
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = ((1e-3));% * randi([1,10]);
            SINR(R+1,j+1) = 20 * log( Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) / ...
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) );
        else
            Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = ((1e-3));% * randi([1,10]);
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) = ((1e-3));% * randi([1,10]);
            SINR(R+1,j+1) = 20 * log( Signal_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) / ...
            Noize_Amplitude_Diagram(R+1,j+1) );
        end
    end
end

axislimits = [0 360 -20 150];
subplot(1,2,2);
plot(0:360, SINR(:,Tetta+1))
grid on
axis(axislimits);
title(['Напр. на помеху, ' num2str(Tetta), ' град.'])
xlabel('Напр на сигнал, град.')
ylabel('Отношение сигнал/помеха, дБ')
```

Далее показаны результаты работы приведённой выше программы для углов прихода помехи равных: 36 градусам (рисунок 2), 118 градусам (рисунок 3) и 221 градусу (рисунок 4).

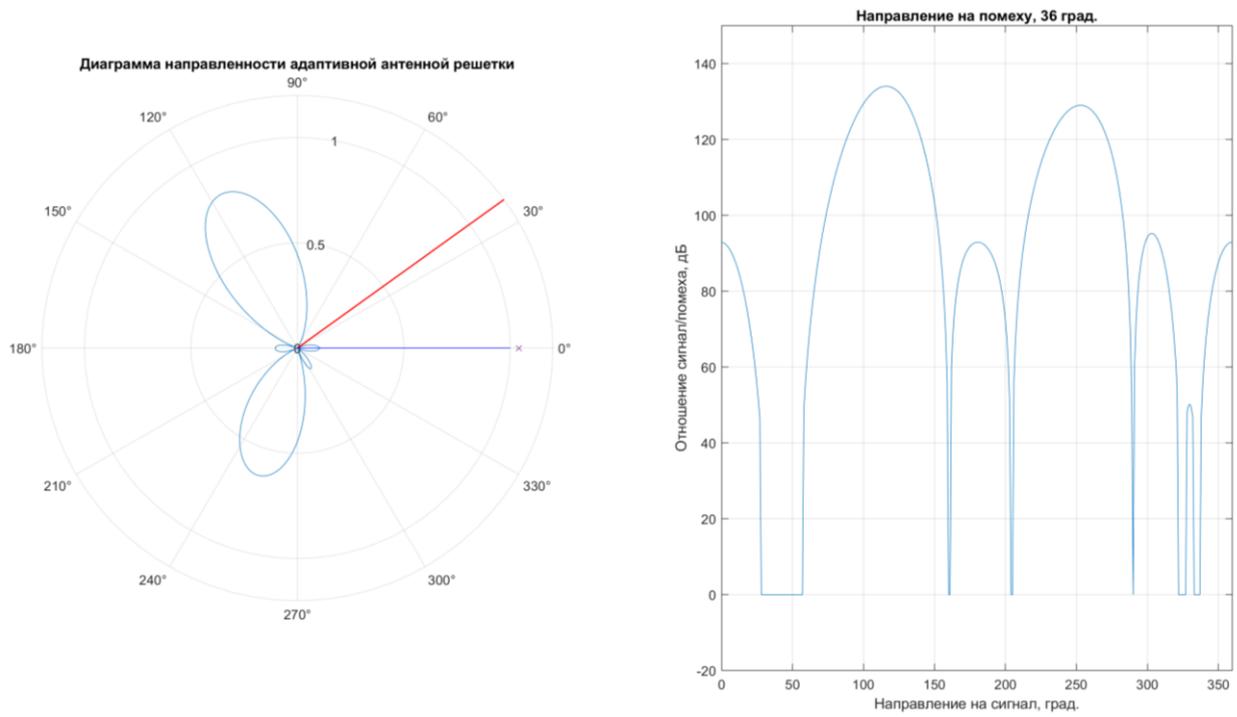


Рис. 2 – диаграмма направленности адаптивной антенной решётки и график ОСПШ для направления прихода помехи 36 градусов

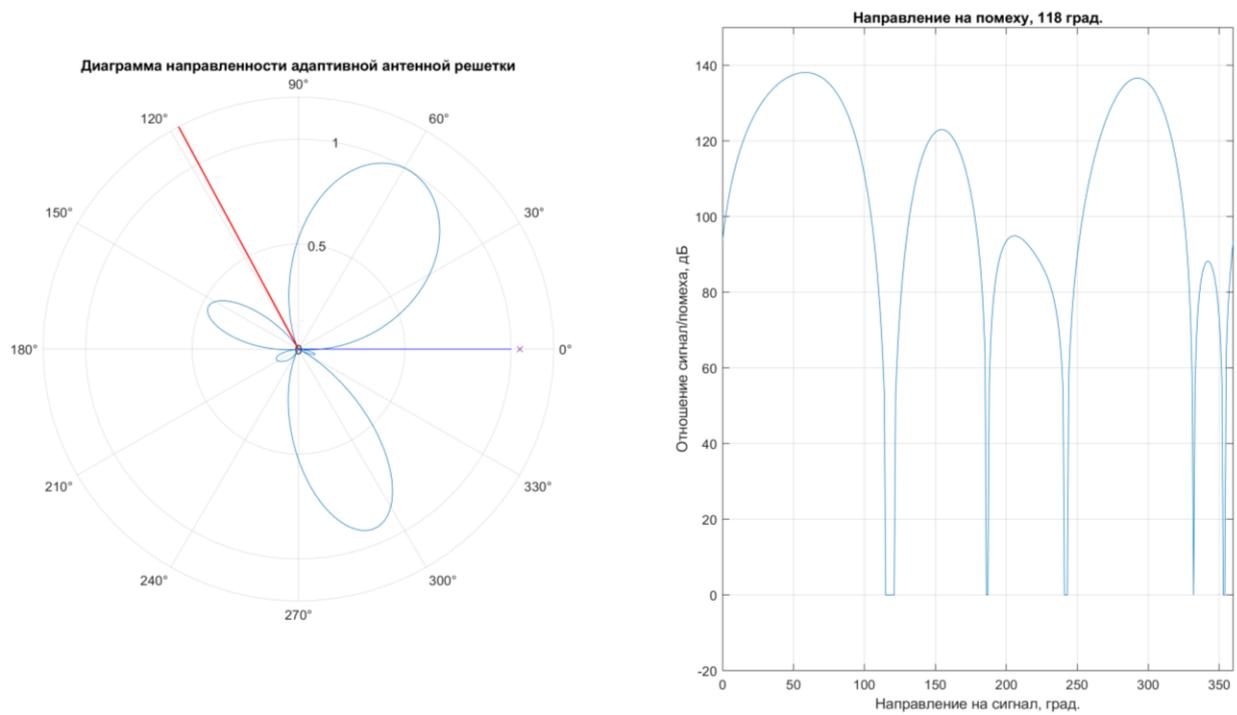


Рис. 3 – диаграмма направленности адаптивной антенной решётки и график ОСПШ для направления прихода помехи 118 градусов

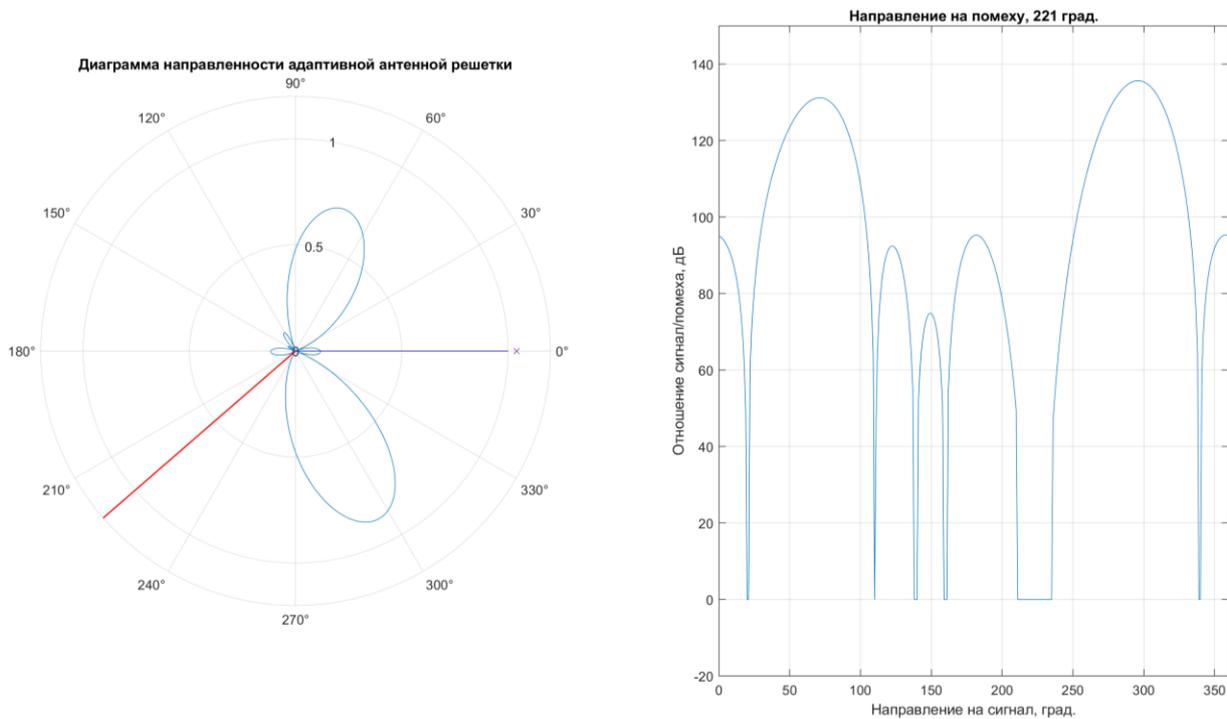


Рис. 4 – диаграмма направленности адаптивной антенной решётки и график ОСПШ для направления прихода помехи 221 градусов

Анализируя полученные графики ОСПШ можно сказать, что значение уровня ОСПШ для большого диапазона направлений прихода полезного сигнала значительно выше 20 дБ. Это значит, что наводимая помеха значительно подавляется, за счёт чего уровень принимаемого сигнала в разы превышает уровень принимаемой помехи.

Таким образом в ходе работы был приведён алгоритм подстройки диаграммы направленности адаптивной антенной решётки для подавления помехи, приходящей с указанного направления. В программе MATLAB R2023a был написан код программы, демонстрирующей работу предлагаемого алгоритма настройки диаграммы направленности адаптивной антенной решетки, а также был получен график отношения уровня принимаемого сигнала к уровню принимаемой помехи, подтверждающий эффективность работы рассматриваемого метода.

Список литературы:

1. Риглер, Комптон Р.Т. Адаптивная антенная решетка для подавления помех.// ТИИЭР. – 1973, – том 61. №6 – стр. 75 – 86.
2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. М77 Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986, – 448 с.
3. Марчук Л.А. Пространственно – временная обработка сигналов в линиях радиосвязи. /Л.: ВАС, 1991, – 135 с.
4. Помехозащищённость радиосистем со сложными сигналами/ Г.И. Тузов М.: Радио и связь, 1986, – 264 с.
5. Лазарев Юрий Федорович Л17 Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие. - К.: НТУУ "КПИ", 2003. - 424 с.