

## ПОДАВЛЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПОМЕХИ В ОДНОМ КЛАССЕ АДАПТИВНЫХ АНТЕН РАДИОНАВИГАЦИИ

*Рассмотрен программный способ подавления широкополосной помехи адаптивной антенной с измерением углов прихода помехи. Проведено математическое моделирование. Оценена эффективность способа.*

### Введение

Одной из актуальных проблем является необходимость повышения помехоустойчивости аппаратуры пользователей СРНС. Действенным способом решения проблемы признано применение адаптивных антенн. Интенсивно адаптивные антенны (АА) стали разрабатываться в 90-е годы прошлого столетия в связи с требованием МО США значительно повысить помехоустойчивость аппаратуры GPS. К настоящему времени многие образцы АА используются во всех видах военной техники.

Эффективность подавления помехи АА, помимо прочих факторов, существенно зависит от ее широкополосности. Так согласно выражению, приведенному в [1], для АА с 2-х элементной антенной решеткой (АР) коэффициент подавления помехи при увеличении ширины спектра до 10 МГц уменьшается на 6 дБ. Причем эта зависимость имеет явно нелинейный характер.

Суть заключается в том, что комплексные весовые коэффициенты, рассчитанные по алгоритму адаптации для частоты  $\omega_1$  помехи, не будут являться таковыми для составляющей частоты  $\omega_2$ , так как нули диаграммы направленности (ДН) решетки смещаются при изменении значения частоты. Отсюда следует, что для обеспечения формирования нуля ДН для всех частот спектра помехи требуется для каждой частоты свое значение комплексного весового коэффициента. Распространенным способом решения этой задачи является использование трансверсального фильтра. Такой фильтр реализуется подключением к элементу антенной решетки многоотводной линии задержки, сигнал с каждого отвода которой подается на свой вектор-модулятор (ВМ), а выходные сигналы ВМ на сумматор. Эффективность такого способа тем выше, чем больше отводов линии задержки (следовательно, ВМ) и чем чаще располагаются отводы. Способ прост, но требует аппаратурного усложнения АА.

Для АА, весовые коэффициенты в которой рассчитываются с учетом измеренных углов прихода помехи [2], представляется возможность решить задачу подавления широкополосной помехи программным способом.

В настоящей работе рассматривается такой способ и исследуется при помощи математического моделирования.

### Формализация способа подавления широкополосной помехи

Для рассматриваемого класса АА весовые коэффициенты адаптации рассчитываются после измерения углов прихода помехи путем решения системы уравнений:

$$W = \Phi^{-1} \cdot B, \quad (1)$$

где  $W$  - вектор весовых коэффициентов;

$$\Phi = \begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j \cdot \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \alpha_i \cdot k} \\ \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j \cdot \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \alpha_n \cdot k} \\ \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j \cdot \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \theta \cdot k} \end{cases} \quad (2)$$

$\Phi$  - матрица фазовых коэффициентов полезных сигналов и помехи по элементам для линейной АР;  
 $d, \lambda$  - шаг и длина волны, соответствующая средней частоте полосы частот АР;  
 $\alpha_i, \theta$  - углы прихода сигналов и помехи;

$N$  - число элементов АР;

$V$  - вектор-столбец с "1" и "0" в строках, соответствующих сигнальным и помеховой строке матрицы  $\Phi$ .

Решение системы (1) при матрице  $\Phi$  вида (2) обеспечивает формирование провала ДН для сигнала помехи с частотой  $\frac{\lambda}{c}$  ( $c$  - скорость света), пришедшего под углом  $\theta$ .

Для того, чтобы весовые коэффициенты реагировали на составляющие помехового сигнала с частотами  $\frac{\lambda_i}{c}$ , матрицу  $\Phi$  следует дополнить строками с фазами, формируемыми с учетом этих частот для направления  $\theta$ .

При этом матрица приобретет вид:

$$\Phi = \begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j \cdot \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \alpha_i \cdot k} \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j \cdot \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \alpha_n \cdot k} \\ \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j \cdot \frac{2\pi d}{\lambda_i} \cdot \sin \theta \cdot k} \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j \cdot \frac{2\pi d}{\lambda_n} \cdot \sin \theta \cdot k} \end{cases} \quad (3)$$

где  $i = 1 \dots nf$ ,  $nf$  - число дискретных частот.

### Методика и результаты исследования

Для исследования разработан комплекс моделей, реализующий формирование амплитудно-фазовых распределений сигналов и помехи по элементам АР, модель линейной АА с измерителем угла прихода помехи, адаптивными вычислителями весовых коэффициентов в соответствии с выражениями (1), (2), (3) и формирователями ДН антенны в адаптивном и обычном режимах работы.

Модель сигнала помехи для  $k$ -го элемента АР представлена в виде:

$$UP_k = \sum_{n=1}^{nf} U_n e^{-j \left( \frac{2\pi d}{\lambda_n} \cdot k \cdot \sin \theta + \vartheta_n \right)},$$

где  $U_n, \vartheta_n$  - случайные числа, распределение по нормальному и равномерному законам соответственно;

$\lambda_n$  - длина волны спектрального компонента помехи.

Показатель подавления помехи определен в виде:

$$K_p(\alpha) = GP(\alpha) - G(\alpha),$$

где  $GP(\alpha), G(\alpha)$  - значения ДН в децибелах в направлении прихода сигнала  $\alpha$  соответственно для адаптивного и обычного режимов системы.

Исследования проводились при следующих исходных данных:  $N = 4$ ;  $d/\lambda = 0,5$ ;  $\lambda = 0,2$  м;  $\alpha_1 = 20^\circ$ ;  $\alpha_2 = 30^\circ$ ;  $\alpha_3 = 80^\circ$ ;  $\theta = 50^\circ$ ; амплитуды полезных сигналов равны 0,001; параметры нормального закона в модели помехи  $[0,1]$ , равномерного  $[-\pi, \pi]$ ;

$$\lambda_i = \frac{c}{1,5 \cdot 10^9 \pm df_2}; \quad df_1 = 1 \text{ МГц}; \quad df_2 = 2 \text{ МГц}; \quad df_3 = 3 \text{ МГц}; \quad df_4 = 5 \text{ МГц}; \quad df_5 = -1 \text{ МГц};$$

$$df_6 = -2 \text{ МГц}; \quad df_7 = -3 \text{ МГц}; \quad df_8 = -5 \text{ МГц}.$$

Исследуем зависимость показателя подавления помехи от состава компонент модели широкополосной помехи. Результаты приведены в таблице, где  $K_{p1}$ ,  $K_p$  – показатели подавления помехи в системах по предлагаемому алгоритму и алгоритму прототипа соответственно. При этом рассмотрены следующие варианты модели помехи по составу с длинами волн: вар.1 -  $\lambda_1, \lambda, \lambda_5$ ; вар.2 -  $\lambda_2, \lambda, \lambda_6$ ; вар.3 -  $\lambda_3, \lambda, \lambda_7$ ; вар.4 -  $\lambda_4, \lambda, \lambda_8$  и проведен расчет показателей для составляющих.

Таблица

вар. 1		вар. 2		вар. 3		вар. 4	
$K_{p1}$	$K_p$	$K_{p1}$	$K_p$	$K_{p1}$	$K_p$	$K_{p1}$	$K_p$
-168	-58	-153	-54	-142	-57	-129	-46
-162	-55	-146	-49	-136	-46	-123	-42
-163	-55	-146	-49	-136	-45	-123	-41

Анализ полученных данных показывает, что обе системы подавляют каждую из частотных составляющих помехи. Коэффициенты подавления уменьшаются с увеличением разности частот дополнительных составляющих относительно центральной частоты АР. Коэффициенты подавления широкополосной помехи в предлагаемой АА значительно превышают показатели прототипа. Показатель подавления составляющей помехи центральной частоты предлагаемым способом равен сумме показателей подавления каждого из частотных компонент помехи АА прототипа.

### Выводы

Как показали исследования, предложенный способ позволяет значительно повысить эффективность подавления многочастотной помехи в классе адаптивных антенн, в которых весовые коэффициенты вычисляются с учетом измеренных углов помехи.

Способ реализуется программно и не требует увеличения аппаратного состава адаптивной антенны. Эффективность повышается с увеличением числа элементов антенной решетки.

### Список литературы

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. - М.: Радио и связь, 1986.-448с.

2. Ковалевський Е.О., Конін В.В., Харченко В.П. Адаптивна антена радіонавігації. Патент України №85225. Бюл. №1, 2009.