

А. А. Г а р а н и н, О. С. Л и т в и н о в,
В. В. С т о р ч а к

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ НАСТРОЙКИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ ФОРМЫ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ И ЗАЩИТА ОТ ПОДАВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ, ПРИХОДЯЩИХ С ЗАДАННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

Представлены результаты математического моделирования алгоритмов адаптации для системы подавления помех в адаптивных антенных решетках с фиксацией главного лепестка и защиты от подавления сигналов, приходящих с заданных направлений.

E-mail: valentin.storchak@gmail.com

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, диаграмма направленности, защита полезного сигнала.

Основное назначение адаптивных антенн — автоматическое подавление помех приему радиосигналов в радиолокации, радионавигации, связи, радиовещании и телевидении, а также радиоастрономии [1].

В данной работе рассмотрены два алгоритма адаптации для системы подавления помех: с защитой трех сигналов и с защитой величины главного максимума и двух ее производных. Диапазон частот функционирования данных алгоритмов можно устанавливать произвольный, так как алгоритм работает с относительными длинами волн, и при автоматической нормировке обрабатывает сигналы на любой длине волны.

Алгоритм защиты трех сигналов применяют в устройствах GPS и ГЛОНАСС, основанных на триангуляционном принципе определения координат объекта. С помощью защиты направления главного максимума и двух близких к нему направлений реализуется алгоритм сохранения формы главного лепестка диаграммы направленности.

В данной работе проведено сравнение качества подавления помех и скорости работы двух алгоритмов: алгоритма защиты трех сигналов и алгоритма защиты сигнала и двух его производных.

Принципы работы адаптивных антенн. Под адаптивной антенной понимаем антенную систему, параметры которой автоматически изменяются так, чтобы обеспечить наилучшие или приближающиеся к ним условия приема полезного сигнала на фоне изменяющихся мешающих внешних воздействий. Сигналы, принятые отдельными антеннами системы, проходят через устройства, регулирующие их амплитуду и фазу (рис. 1), и складываются в сумматоре, каждый со своим весовым коэффициентом (ВК), обозначаемым w_k .

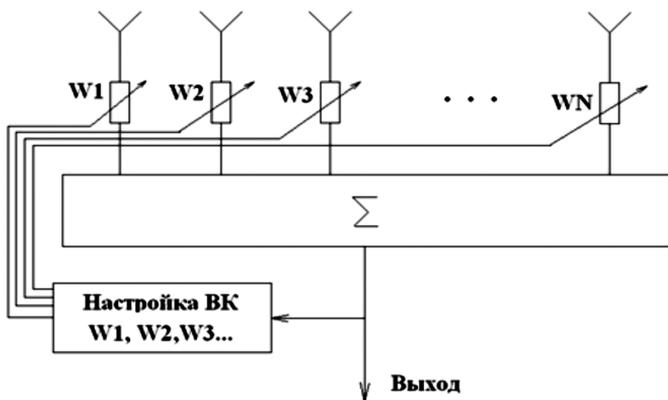


Рис. 1. Устройство адаптивной антенны

В отсутствие помехи (в состоянии покоя) ВК обеспечивают получение желаемой диаграммы направленности (ДН), а при наличии помехи служат для ее подавления. Процесс адаптации осуществляется путем обратного воздействия на устройства, управляющие ВК, которое обеспечивает подавление помехи в соответствии с некоторым критерием, который фиксирует выполнение специфических требований, сопровождающих это подавление. Характер и программа указанного воздействия образуют так называемый алгоритм адаптации. Алгоритм называется аналоговым, если задача решается чисто схемным путем, цифровым, если он реализуется на ЭВМ, и гибридным, когда с помощью ЭВМ после соответствующего расчета осуществляется регулирование амплитуды и фазы сигналов. Естественно, что помеха не может быть подавлена до нуля. Глубина ее подавления зависит от уровня мощности \bar{n}_0^2 собственных шумов антенн, входящих в систему. В теории адаптивных антенн принято считать, что эти шумы не коррелированы ни между собой, ни с помехой, ни с полезным сигналом. Поэтому суммарная мощность собственных шумов системы из N антенн

$$P_{\text{с.ш}} = \sum_{k=1}^N \bar{n}_0^2 |w_k|^2.$$

Таким образом, регулировка ВК в процессе адаптации изменяет и уровень собственных шумов, что необходимо учитывать при расчетах и формулировке критериев качества подавления помех.

Адаптация по критерию минимума шума при защите полезного сигнала. Обычно ограничение сводят к устранению подавления в направлении прихода полезного сигнала и фиксированию значения ненормированной ДН в этом направлении. При наличии одной помехи мощностью ν значение адаптированной ДН эквидистантной решетки

из N элементов в направлении на помеху будет

$$g_0(\vartheta_1) = \frac{g(\vartheta_1)}{\{1 + vN[1 - F^2(\vartheta_1)]\}}.$$

В направлении главного максимума ($\vartheta = 0$, $F(\vartheta) = 1$ и $g_0(\vartheta_1) = g(\vartheta_1)$) подавления не происходит. Если помеха приходит со стороны первого бокового лепестка, для которого $F^2(\vartheta_1) = 0,045$, ее амплитуда подавляется почти в $1 + vN$ раз. Даже если направление помехи задевает главный максимум и соответствует его половинной мощности, подавление в $1 + 0,5vN$ раз остается достаточно сильным.

Теория адаптации по рассматриваемому критерию распространена и на случай нескольких помех.

Исследуемый алгоритм адаптации обеспечивается соответствующим подбором ВК и их регулировкой при изменении помеховой обстановки. Наиболее распространенным является гибридный алгоритм адаптации, при котором посредством ЭВМ контролируют выходную мощность и посылают сигналы, управляющие величиной ВК.

Корреляционная матрица сигнала. Определим мощность сигнала на выходе адаптивной антенной решетки (ААР), если его источник находится в направлении, задаваемом вектором S_ϑ . Полагаем, что мощность пропорциональна квадрату напряжения сигнала, причем коэффициент пропорциональности, задаваемый значением сопротивления нагрузки, для простоты считаем равным единице:

$$Y_{\text{вых}} = \sqrt{v} X_T W,$$

где v — мощность сигнала, выраженная в некоторых единицах, подлежащих уточнению (обычно эта мощность определяется по отношению к уровню собственных шумов). Отсюда

$$P_{\text{вых}} = |Y_{\text{вых}}|^2 = v |W_T S_\vartheta|^2 = v (W_T^* S_\vartheta^* S_{\vartheta T} W) = W_T^* M_\vartheta W, \quad (1)$$

где $M_\vartheta = v S_\vartheta^* S_{\vartheta T}$ — матрица размером $N \times N$. Из выражения (1) следует, что $P_{\text{вых}}$ является квадратичной формой вектора весовых коэффициентов (ВВК), порождаемой матрицей M_ϑ .

Нетрудно убедиться, что матрица M_ϑ — это корреляционная матрица узкополосного случайного стационарного процесса, поскольку ее элементами являются попарные произведения значений огибающих напряжений на различных приемных элементах ААР:

$$M_\vartheta = v S_\vartheta^* S_{\vartheta T} = v \begin{bmatrix} S_{\vartheta_1}^* S_{\vartheta_1} & S_{\vartheta_1}^* S_{\vartheta_2} & \dots & S_{\vartheta_1}^* S_{\vartheta_N} \\ S_{\vartheta_2}^* S_{\vartheta_1} & S_{\vartheta_2}^* S_{\vartheta_2} & \dots & S_{\vartheta_2}^* S_{\vartheta_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{\vartheta_N}^* S_{\vartheta_1} & S_{\vartheta_N}^* S_{\vartheta_2} & \dots & S_{\vartheta_N}^* S_{\vartheta_N} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матрица обладает свойством

$$M_{\vartheta} = M_{\vartheta T}^*,$$

в соответствии с которым ее называют эрмитовой. Эрмитовость матрицы является следствием неотрицательности соответствующей квадратичной формы. В нашем случае неотрицательность $W_T^* M_{\vartheta} W$ выполняется при $W \neq 0$ благодаря тому, что в выражении (1) всегда $P_{\text{вых}} \geq 0$.

Для нескольких одновременно действующих сигналов с направлений $\{\vartheta_j\}_{j=1}^I$, не коррелированных между собой, корреляционная матрица (2) обобщается следующим образом:

$$M = \sum_{j=1}^I M_{\vartheta_j} = \sum_{j=1}^I v_j S_{\vartheta_j}^* S_{\vartheta_j T},$$

где v_j — мощность j -го источника сигнала ($j = 1, 2, \dots, I$), выраженная по отношению к средней мощности собственных шумов на выходе приемных элементов; I — общее число источников сигналов.

Если учесть, что на выходе ААР принятые сигналы наблюдаются на фоне собственных шумов, которые будем считать взаимно некоррелированными для разных каналов и с сигналами помех, то корреляционная матрица суммарного сигнала на выходе ААР будет

$$M_{\Sigma} = \overline{n_0^2} I_N + \overline{n_0^2} \sum_{j=1}^I v_j S_{\vartheta_j}^* S_{\vartheta_j T}.$$

Критерии функционирования ААР. Критерием качества приема полезного сигнала может служить:

- отношение сигнал / (шум + помеха) на выходе ААР;
- мощность собственных шумов и помехи на выходе ААР;
- среднеквадратичное отклонение сигнала на выходе ААР от сигнала, заданного заранее (пилот-сигнала).

Математические выражения перечисленных выше критериев представляют собой функционалы, определенные в пространстве ВВК. Например, мощность суммарных шумов на выходе ААР определяется квадратичным функционалом

$$\Phi(W) = W_T^* M W,$$

где M — матрица собственных шумов и помех.

Решение задачи оптимизации соответствующего функционала заключается в определении вектора весовых коэффициентов W , исходя из условия максимума или минимума функционала. Выражение для вектора ВК, являющегося решением задачи оптимизации соответствующего функционала в зависимости от параметров помеховой

обстановки, геометрии и других характеристик антенны, называется оптимальным законом подбора ВК.

В ААР оптимальный подбор ВК осуществляется автоматически: для этого соответствующим образом должно быть построено устройство адаптации. В частности, одним из основных методов математического программирования является градиентный метод оптимизации функционала. Если у функционала $\Phi(W)$ в окрестности оптимальной точки существуют первые производные по составляющим вектора W , то может быть определен вектор $\nabla\Phi(W)$, носящий название градиента функционала

$$(\nabla\Phi(W))_T = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial w_1}, \frac{\partial\Phi}{\partial w_2}, \dots, \frac{\partial\Phi}{\partial w_N} \right).$$

Синтез схемы ААР, минимизирующей мощность сигналов на выходе ААР и одновременно защищающей полезный сигнал. Решим задачу минимизации функционала

$$\Phi(W) = W_T^* M W$$

при наличии ограничения

$$F(\vartheta_c) = W_T S_{\vartheta_c} = \text{const},$$

где $F(\vartheta_c)$ — значение ДН ААР в направлении на полезный сигнал. При условии фиксирования ДН в направлении прихода полезного сигнала, априорную информацию о котором предполагаем известной, мощность полезного сигнала на выходе ААР в процессе адаптации будет неизменна:

$$P_c(t) = \alpha_c^2 |W_T(t) S_{\vartheta_c}|^2 = \alpha_c^2 |F(\vartheta_c)|^2 = \alpha_c^2 \text{const}$$

(где α_c^2 — мощность полезного сигнала), т.е. полезный сигнал будет защищен от действия адаптации [2].

Для определения градиента оптимизируемого функционала при наличии ограничений будем использовать геометрический подход, состоящий в том, что оптимизация осуществляется с помощью проектирования градиента функционала без ограничений на подпространство ВВК, составляющих ограничение. В нашем случае подпространство весовых векторов, составляющих ограничение, представляет собой гиперплоскость, задаваемую уравнением

$$W_T S_{\vartheta_c} = \text{const}. \quad (3)$$

Следовательно, для построения оптимизирующей последовательности необходимо проектировать градиент на гиперплоскость (3). Для этого представим $\nabla\Phi$ в виде суммы двух векторных компонент — параллельной ($\nabla_{\parallel}\Phi$) и перпендикулярной ($\nabla_{\perp}\Phi$) гиперплоскости (3):

$$\nabla\Phi(W) = (\nabla_{\parallel}\Phi) + (\nabla_{\perp}\Phi).$$

Тогда алгоритм адаптации будет следующим:

$$W^{(j+1)} = W^{(j)} - k \nabla_{\parallel} \Phi.$$

Компонента $\nabla_{\perp} \Phi$ может быть определена путем проектирования $\nabla \Phi(w)$ на вектор $S_{\vartheta_c}^*$, являющийся нормалью к гиперплоскостям [3], т.е.

$$\nabla_{\perp} \Phi = S_{\vartheta_c}^* (S_{\vartheta_c}^*, \nabla \Phi(w)) / \|S_{\vartheta_c}^*\|^2,$$

где квадрат нормы вектора $\|S_{\vartheta_c}^*\|^2 = S_{\vartheta_c T} S_{\vartheta_c}^*$.

Учитывая, что $\nabla \Phi = 2(MW) = 0$, получаем

$$\nabla_{\parallel} \Phi = MW - \frac{1}{\|S_{\vartheta_c}^*\|^2} (S_{\vartheta_c T} MW) S_{\vartheta_c}^*.$$

Численное моделирование. Рассмотрим адаптивную антенную решетку, состоящую из $N = 30$ элементов. Выберем направления прихода полезного сигнала (защищаемые направления) $\vartheta_1 = 0^\circ$, $\vartheta_2 = -1^\circ$, $\vartheta_3 = 1^\circ$. Зададим помехи, приходящие с направлений $\vartheta_{p1} = -17^\circ$, $\vartheta_{p2} = -13^\circ$, $\vartheta_{p3} = -9^\circ$, $\vartheta_{p4} = 9^\circ$, $\vartheta_{p5} = 13^\circ$.

Результаты расчета для глубины подавления представлены в табл. 1 и на рис. 2. Число итераций – 72.

Таблица 1

Подавление помех алгоритмом защиты трех сигналов

Номер помехи	Угол ϑ , град	Глубина подавления, dB
1	-17	156
2	-13	155
3	-9	154
4	9	154
5	13	156

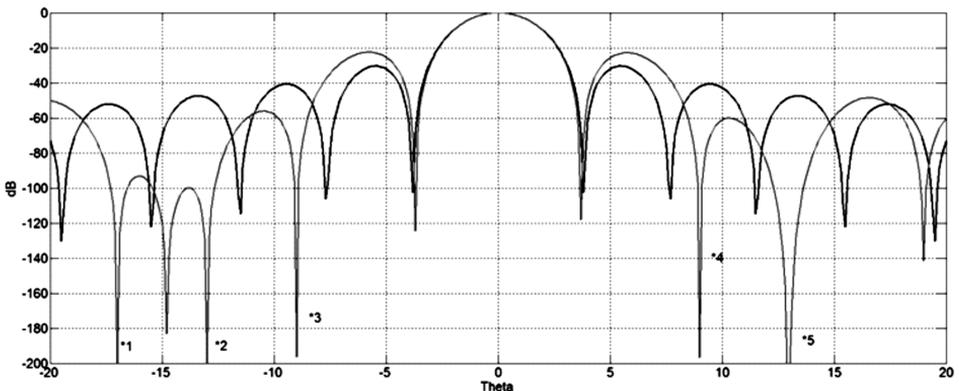


Рис. 2. Подавление помех с защитой трех сигналов при $N = 30$

Рассмотрим другой алгоритм: защитим сигнал и две его производные в направлении $\vartheta_1 = 0^\circ$. Помехи приходят с тех же направлений: $\vartheta_{p1} = -17^\circ$, $\vartheta_{p2} = -13^\circ$, $\vartheta_{p3} = -9^\circ$, $\vartheta_{p4} = 9^\circ$, $\vartheta_{p5} = 13^\circ$. Полученные результаты расчета для глубины подавления приведены в табл. 2 и на рис. 3. Число итераций – 12 876.

Таблица 2

Подавление помех алгоритмом защиты величины главного максимума и двух ее первых производных

Номер помехи	Угол ϑ , град	Глубина подавления, dB
1	-17	162
2	-13	162
3	-9	161
4	9	161
5	13	162

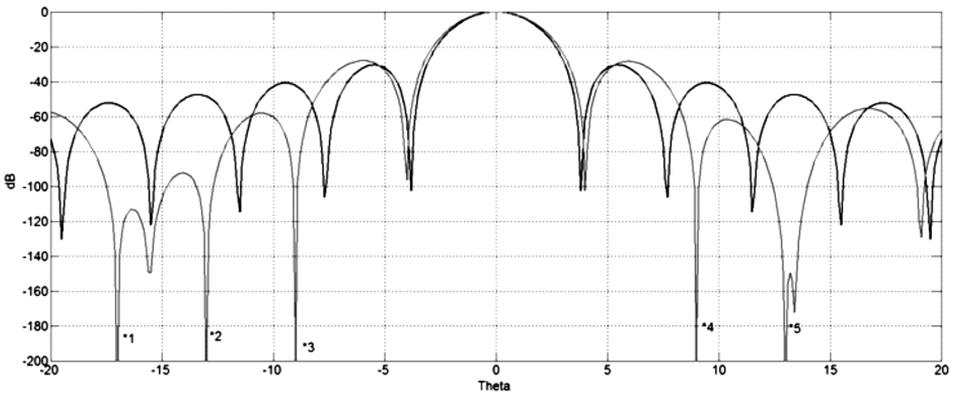


Рис. 3. Подавление помех с защитой величины максимума диаграммы направленности и первых двух ее производных, $N = 30$

Из полученных результатов видно, что оба алгоритма обеспечивают высокий уровень подавления помех с очень небольшой разницей в эффективности подавления. При этом алгоритм защиты трех сигналов работает итерационно быстрее на три порядка – в случае малого числа (30) элементов решетки.

Также установлено, что расстояние между защищаемыми направлениями практически не влияет на глубину подавления помех. Увеличивая данный параметр (в пределах главного лепестка), можно добиться более качественной защиты главного лепестка диаграммы направленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 448 с.
2. Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. – М.: Наука, 1991. – 200 с.
3. Аоки М. Введение в методы оптимизации функционалов. – М.: Наука, 1976. – 344 с.

Статья поступила в редакцию 05.07.2012