

Алгоритм адаптации для антенной решетки систем космической связи в стационарных условиях сигнально-помеховой обстановки

Adaptation algorithm for space communication system antenna array at stationary condition of signal and interference environment

Бибарсов / **Vibarsov M.**

Марат Рашидович

(VibarsovMR@rambler.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»

(ВАС им. С. М. Буденного) МО РФ,

доцент кафедры.

г. Санкт-Петербург

Алешин / **Alyoshin S.**

Степан Леонидович

(asl.87@mail.ru)

ВАС им. С. М. Буденного,

начальник учебной лаборатории.

г. Санкт-Петербург

Габриэльян / **Gabrieljan D.**

Дмитрий Давидович

(D.gabrieljan2011@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГУП «Ростовский-на-Дону

научно-исследовательский институт радиосвязи»,

заместитель начальника НТК по науке.

г. Ростов-на-Дону

Ладька / **Ladyka M.**

Максим Борисович

(ladyka-maksim@mail.ru)

88 Главный центр МО РФ,

заместитель начальника отдела.

г. Москва

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка – adaptive antenna array; диаграмма направленности – radiated pattern; весовые коэффициенты – weight coefficient; система космической связи – space communication system.

В статье представлен рекуррентный алгоритм адаптации, реализующий метод адаптивного подавления помех антенной решеткой систем космической связи в стационарных условиях сигнально-помеховой обстановки по критерию отношение сигнал/(помеха+шум) в установившемся и переходном режимах.

The paper introduces recurrence adaptation algorithm implementing interference adaptive suppression by space communication system antenna array practice at stationary condition of signal and interference environment by signal/(interference+noise) ratio criterion in steady state and transient mode.

Введение

В инфокоммуникационных структурах современного общества системы космической связи (СКС), в том числе спутниковой связи, занимают важное место и стремительно продолжают развиваться. Разработка и эффективное использование СКС рассматривается государствами как стратегический ресурс решения глобальных задач [1]. С решением этих задач все более важное значение приобретает применение адаптивных антенных решеток (ААР) в СКС, позволяющих созда-

вать узкие лучи диаграммы направленности, определять направление прихода сигналов, формировать максимум характеристики направленности в направлении прихода полезного сигнала и «нули» в направлении воздействия помех непрерывно в реальном масштабе времени в условиях априорной неопределенности.

Целью статьи является анализ функционирования метода адаптивного подавления помех антенной решеткой систем космической связи в стационарных условиях сигнально-помеховой обстановки. В работе рассматривается рекуррентный алгоритм адаптации, реализующий метод адаптивного подавления по критерию отношение сигнал/(помеха+шум) (ОСПШ) в установившемся и переходном режимах.

Под стационарными условиями сигнально-помеховой обстановки будем понимать независимость угловых координат источников сигналов и помех от времени, т.е. местоположение спутниковых станций и спутников-ретрансляторов, а также станций постановщиков помех не меняется в пространстве и времени (рис. 1).

Обеспечение максимального ОСПШ с необходимой формой ДН для подавления помех должно происходить в установившемся режиме, наступающим после переходного процесса. Переходной процесс (режим) представляет собой режим адаптации, определяемый временем функционирования алгоритма для отслеживания условий сигнально-помеховой обстановки. Переходной режим характеризуется скоростью сходимости (адаптации), которая, в свою очередь, имеет зависимость с такими характеристиками, как точность адаптации, форма ДН в установившемся режиме, глубина форми-

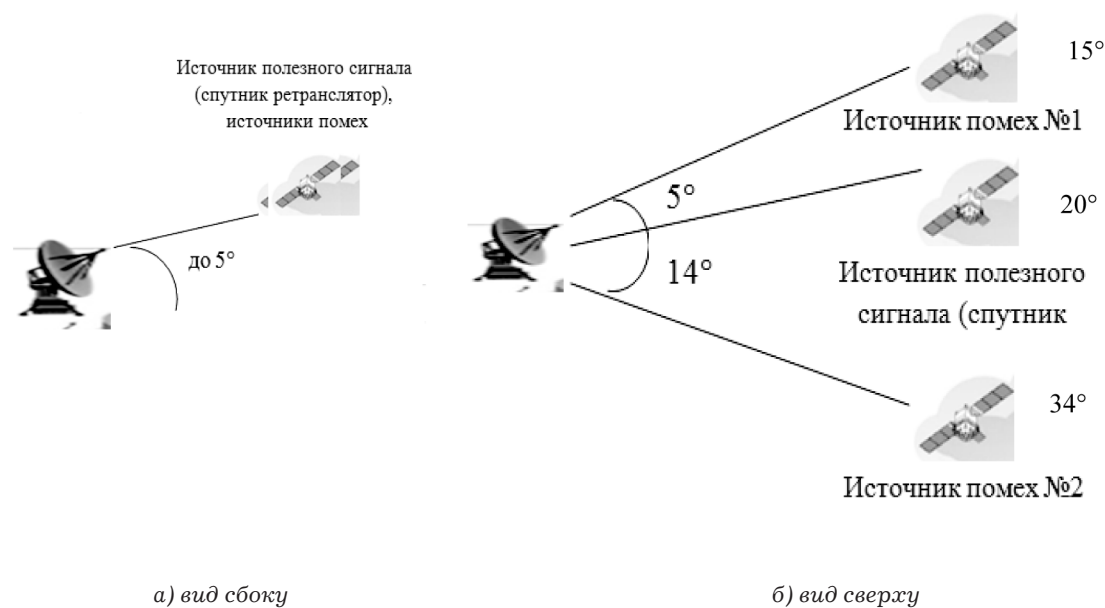


Рис. 1. Сигнально-помеховая обстановка

рования «нулей» в направлении прихода помех и др.

Основным показателем качества радиолиний СКС является их помехоустойчивость, которая при передаче дискретных (цифровых) сообщений определяется функциональной зависимостью вероятности ошибки ($P_{ош}$) при приеме информационного символа от отношения энергии сигнала длительностью T_c на входе приемника $E_c = P_c \cdot T_c$ (P_c – мощность принимаемого сигнала) к спектральной мощности шума N_0 . Для СКС вероятность ошибки не должна превышать допустимого значения $P_{ош доп.} = 10^{-5}$ на наиболее напряженной линии по энергетике «искусственный спутник земли – земная станция», что в свою очередь требует обеспечения энергетического отношения сигнал/шум (ОСШ) $h^2 = 11 \dots 13 \text{ дБ} \approx 20$ раз. Для компенсации изменений условий распространения радиоволн, юстировки антенн и т.д. вводится энергетический запас радиолинии $\Delta h^2 \leq 10 \text{ дБ}$ [1].

Условие осуществления космической радиосвязи имеет вид [1, 6, 7]:

$$h^2 = E_c / N_0 = (P_c / P_0) \cdot B_c = ((P_{прд} \cdot G_{прд} \cdot \eta_{прд} \cdot G_{прм} \cdot \eta_{прм} \cdot W_0^2 \cdot W_{тр}^2) / P_0) \cdot B_c \geq h_n, \quad (1)$$

где P_c – мощность сигнала на входе приемника, P_0 – мощность шума, B_c – база сигнала, $P_{прд}$ – мощность передатчика, $G_{прд}, G_{прм}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, $\eta_{прд}, \eta_{прм}$ – коэффициенты полезного действия фидеров передающей и приемной антенн, $W_0 = (\lambda / (4\pi r))^2$ – множитель ослабления свободного пространства сигнала по мощности с несущей

частотой $f = c / \lambda$ на расстоянии r , c – скорость света, λ – длина волны, $W_{тр}^2 \leq 1$ – множитель ослабления мощности сигнала на реальной трассе.

Поэтому при заданных $P_{прд} \leq 40 \text{ Вт}$, $G_{прд} \approx 20 \text{ дБ}$, $G_{прм} \approx 40-50 \text{ дБ}$ требуемое значение $E_c = P_c \cdot T_c = (P_{прд} \cdot G_{прд} \cdot \eta_{прд} \cdot G_{прм} \cdot \eta_{прм} \cdot W_0^2 \cdot W_{тр}^2) / R$ (R – скорость передачи информации) в СКС обеспечивается выбором коэффициентов усиления передающей и приемной антенн.

Из теоремы Шеннона известно, что информацию по каналу радиосвязи можно передавать со сколь угодно высокой достоверностью, если скорость передачи R не превышает пропускной способности канала $R < C$. Пропускная способность определяется соотношением

$$C = \Delta F_c \cdot \log(1 + P_c / P_{п+ш}) \quad (2)$$

Таким образом, при заданной скорости передачи ($R = 1 / T_c$), ограниченной мощности передаваемого сигнала $P_{прд}$, учете множителя ослабления радиоволн W_0 и $W_{тр}$, ограниченных возможностях ΔF_c , основное внимание уделяется предельно возможному увеличению ОСШ h^2 . Условие (1) выполняется при невозмущенной ионосфере и в случае отсутствия преднамеренных помех.

Наиболее эффективным способом борьбы с преднамеренными помехами является применение ААР, которые способны определять направление воздействия помех и подавлять их в условиях отсутствия априорной информации о сигнально-помеховой обстановке. В состав ААР входит антенная решетка, диаграммообразующая схема и адаптивный процессор, подстраивающий весовые коэффициенты для формирования максимума диаграммы направленности в направлении

прихода полезного сигнала $S(t)$ и «нулей» диаграммы направленности в направлении воздействия помех.

Адаптивный процессор функционирует в соответствии с алгоритмом управления по заданному критерию эффективности. Поскольку оптимальные решения при использовании указанных критериев эффективности взаимосвязаны, важным является выбор алгоритма адаптации, влияющего на сложность антенной системы в целом и скорость переходного процесса. К таким алгоритмам относятся: градиентные, непосредственного обращения ковариационной матрицы сигналов, рекуррентные и случайного поиска.

Критерий эффективности выбирается в соответствии с требуемыми характеристиками адаптивной системы в установившемся режиме. В системах радиосвязи, радиолокации и навигации в основном применяют критерии минимума среднеквадратической ошибки и максимума ОСПШ.

Постановка задачи

Рассмотрим N -элементную адаптивную антенную решетку с известной геометрией излучающего раскрыва. Направление прихода θ_0, φ_0 полезного сигнала известно (положение спутника ретранслятора). Угловые координаты источников помех неизвестны. Требуется определить оптимальный весовой вектор, обеспечивающий подавление помеховых сигналов в соответствии с критерием максимума ОСПШ, а также провести анализ функционирования алгоритма адаптации в установившемся и переходном режимах.

Подавление помех в ААР выполняется путем расчета вектора весовых коэффициентов \mathbf{W} , обеспечивающего формирование нулей ДН в направлении источников помех. Показателем качества для оценки работы диаграммообразующей схемы используем критерий максимума ОСПШ, который можно представить в следующем виде [2–5]:

$$Q = \frac{\mathbf{W}^T \mathbf{R}_{ss} \mathbf{W}^*}{\mathbf{W}^T \mathbf{R}_{nn} \mathbf{W}^*}, \quad (3)$$

где \mathbf{R}_{ss} – ковариационная матрица полезного сигнала; \mathbf{R}_{nn} – ковариационная матрица собственного шума и внешних помех; \mathbf{W} – вектор весовых коэффициентов в каналах пространственной обработки; * – символ операций комплексного сопряжения.

Вектор весовых коэффициентов, оптимальный по критерию максимума ОСПШ, может быть найден в виде:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{S}_0^*, \quad (4)$$

где \mathbf{S}_0 – управляющий вектор, элементами которого являются комплексные амплитуды сигналов элементов антенной решетки, обеспечивающие формирование главного максимума ДН в направлении полезного сигнала.

В этих условиях матричное дифференциальное уравнение для определения адаптивных весовых коэффициентов в системах непрерывного времени имеет вид [3]:

$$\tau \frac{d\mathbf{W}}{dt} + [\mathbf{E} + \gamma \mathbf{R}_{nn}] \mathbf{W} = \mathbf{S}_0^*, \quad (5)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица; τ – постоянная времени; γ – характеризует коэффициент передачи контура управления и одинаков для всех контуров.

В дискретной форме алгоритм (5) может быть представлен следующим рекуррентным соотношением:

$$\mathbf{W}(k+1) = [\mathbf{E} + \gamma \mathbf{R}_{nn}] \cdot \mathbf{W}(k) + \Delta \mathbf{W}(k) \quad (6)$$

где $\mathbf{W}(k+1)$ – ВВК на $(k+1)$ -м шаге оценивания; $\mathbf{W}(k)$ – значения ВВК на k -м шаге; $\Delta \mathbf{W}(k)$ – вектор, характеризующийся нормальным законом распределения с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Параметры γ и σ^2 должны выбираться так, чтобы обеспечивались как устойчивость, так и достаточная скорость сходимости алгоритма. Следует отметить, что при выполнении $\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{S}_0^*$ ОСПШ достигает максимального значения, когда $Q = \mathbf{W}^T \mathbf{R}_{nn} \mathbf{W}$, т.к. матрица \mathbf{R}_{nn} является эрмитовой, т.е. $(\mathbf{R}_{nn}^{-1})^T = \mathbf{R}_{nn}^{-1}$.

При отсутствии полезного сигнала рассматриваемый алгоритм с точностью до постоянного множителя совпадает с алгоритмом по критерию минимума среднеквадратической ошибки (СКО). При этом выбор управляющего вектора \mathbf{S}_0^* в алгоритме по критерию максимума ОСПШ эквивалентен выбору вектора взаимной корреляции принимаемых и опорного сигналов \mathbf{R}_{xd} в алгоритме по критерию минимума СКО при условии $\mathbf{R}_{xd} = \mathbf{S}_0^*$, что позволяет получить одинаковые значения оптимального ВВК для двух алгоритмов [2,3].

Результаты моделирования

Моделирование стационарного, переходного и установившегося режимов функционирования полученного алгоритма проводилось на примере эквидистантной линейной ААР с равномерным амплитудным распределением, в которой излучатели расположены с шагом, равным половине длины волны. Рассматривались две ситуации, при которых полезный сигнал поступает с направления $\varphi = 20^\circ$ с относительной мощностью $P_0 = 1$ и воздействуют 2 помехи с направлений $\varphi_1 = 15^\circ, \varphi_2 = 34^\circ$:

1. Линейная ААР из 32 элементов, мощность каждой из помех превышает уровень мощности полезного сигнала в 1000 раз ($P_{\text{п1}} = 1000$).

2. Линейная ААР из 32 элементов, мощность первой помехи превышала мощность полезного сигнала в 1000 раз, а мощность второй помехи – в 100 раз ($P_{\text{п2}} = 100$).
Графики переходного, стационарного и установившегося режимов функционирования ААР, а также графики

изменения диаграмм направленности антенной решетки в процесс адаптации представлены на рисунках 2–4 соответственно к каждой имитационной ситуации.

Алгоритм работает следующим образом. В состоянии до момента времени t_0 , когда отсутствует полезный сигнал и помехи, ААР имеет исходное амплитудно-фазовое распределение (АФР), характеризующееся наличием только внутренних шумов элементов антенной решетки. Поскольку о направлении прихода полезного сигнала имеется априорная информация, главный лепесток ДН настроен именно на это направление (стационарный режим функционирования ААР). При наступлении момента времени t_0 с приходом полезного сигнала ААР настроена на полезный сигнал, а ОСПШ (отношение мощности полезного сигнала к внутренним шумам) равно

для 32-х элементной ААР $Q = \mathbf{W}^T \mathbf{R}_{nn} \mathbf{W} = 30,343$ дБ (рис. 2). В момент времени t_1 помехи воздействуют по боковым лепесткам ДН, в результате этого ОСПШ уменьшается, т.к. мощности помех весьма велики. Измеритель уровня полезного сигнала на выходе ААР регистрирует уменьшение ОСПШ и подает сигнал управления для запуска режима адаптации. С началом функционирования алгоритма адаптации наступает переходной процесс, в ходе которого формируются «нули» ДН в направлении воздействия помех с сохранением направления главного лепестка на источник полезного сигнала (рис. 4, 5). По окончании переходного процесса (время t_2) наступает установившийся режим, когда главный лепесток ДН направлен на полезный сигнал, а в направлении помех сформированы достаточные

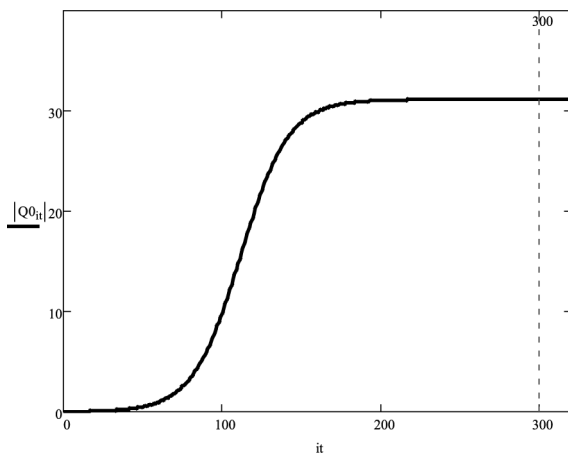


Рис. 2. Переходной процесс при $P_{П1}/P_0=1000$ и $P_{П2}/P_0=1000$: для 32-х элементной ААР

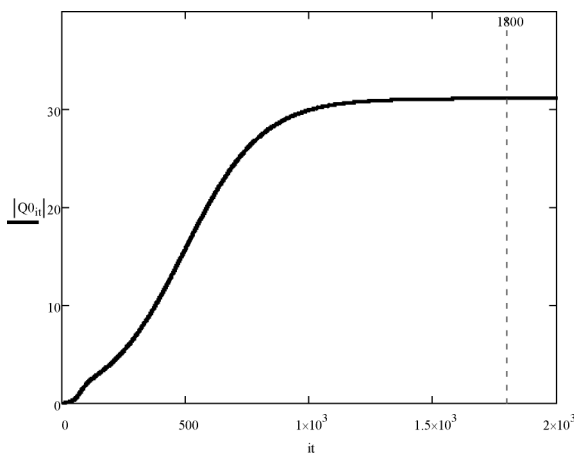


Рис. 3. Переходной процесс при $P_{П1}/P_0=1000$ и $P_{П2}/P_0=100$: для 32-х элементной ААР

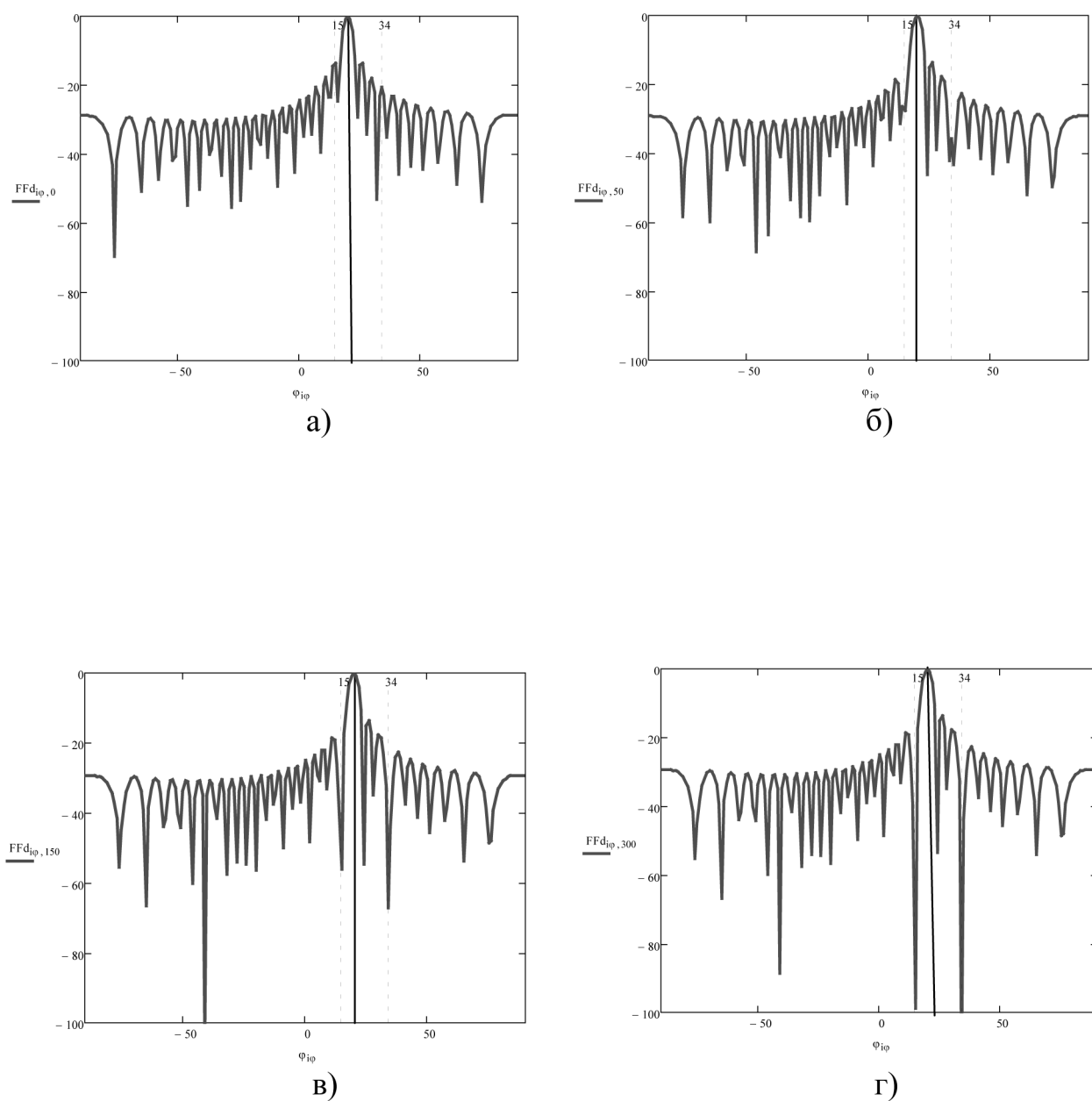


Рис. 4. Изменение ДН 32-х элементной ААР в процессе адаптации ($P_{\text{П1}}/P_0=1000$ и $P_{\text{П2}}/P_0=1000$):
 а – стационарный режим; б – на 50-м шаге;
 в – на 150-м шаге; г – установившийся режим

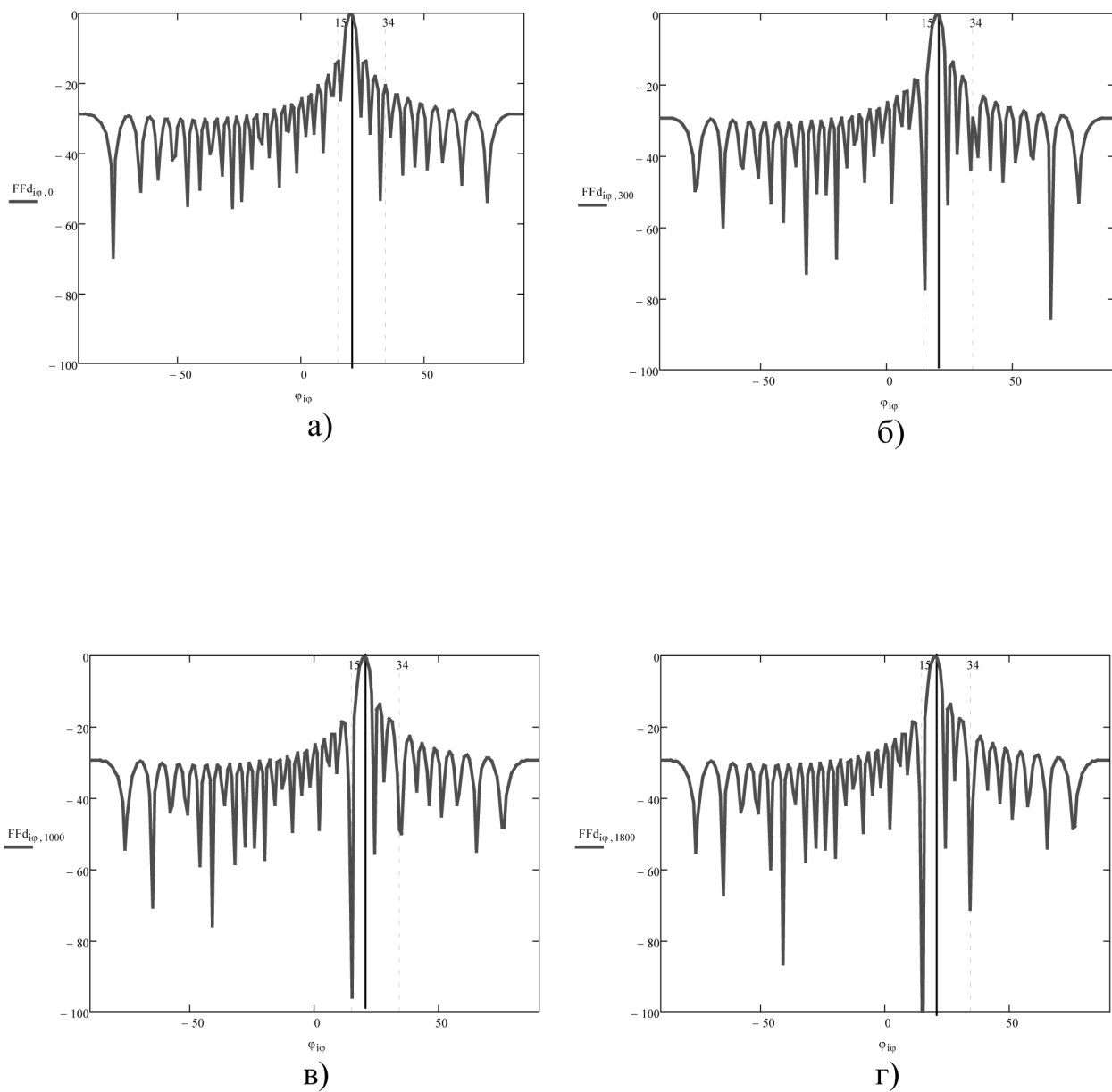


Рис. 5. Изменение ДН 32-х элементной ААР в процессе адаптации ($P_{П1}/P_0=1000$ и $P_{П2}/P_0=100$):
 а – стационарный режим; б – на 50-м шаге;
 в – на 150-м шаге; г – установившийся режим

провалы ДН для обеспечения оптимального ОСПШ (рис. 4г, 5г).

Моделирование работы алгоритма адаптации позволяет сделать следующие выводы:

1. Увеличение мощности помех приводит к уменьшению количества шагов и формированию более глубоких «нулей» ДН. Чем меньше уровень помех, тем выше уровень «нулей» ДН и время переходного процесса увеличивается. Рис. 5 показывает, что при превышении мощности помехи мощность полезного сигнала в 1000 раз обеспечивается подавление помехи более чем на 100 дБ, а при $P_{\Pi 2}/P_0 = 100$ формируется уровень «нуля» –70 дБ для 32-х элементной ААР. При этом полное схождение переходного процесса достигается за 1800 шагов. При $P_{\Pi 1}/P_0=1000$ и $P_{\Pi 2}/P_0=1000$ полное схождение переходного процесса достигается за 300 шагов (момент времени t_2).

2. При уменьшении значения коэффициента передачи конгура управления γ , обеспечивающего устойчивость и достаточную скорость сходимости алгоритма, количество шагов растет, а точность увеличивается. Однако выбор слишком малого значения γ приводит к тому, что переходной процесс не сходится, а слишком большого – к его расходимости.

Рассмотренный алгоритм целесообразно использовать в СКС для подавления помех в стационарных условиях сигнально-помеховой обстановки, то есть когда наземная станция и СР неподвижны относительно друг друга и пространственное положение источника помех не изменяется. В случае приема широкополосных сигналов следует использовать трансверсальные фильтры [3] в каждом канале адаптации или метод, описанный в [8].

Авторы видят дальнейшее направление исследований в анализе функционирования ААР с применением алгоритма (6) в условиях, когда происходит изменение пространственного положения источников полезного сигнала и помех.

Литература

1. Маслов, О. Н. Модели трансферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи / О.Н. Маслов, В.П. Пашинцев. – Самара, 2006. – 357 с.
2. Самойленко, В. И. Управление фазированными антенными решетками / В.И. Самойленко, Ю.А. Шишов. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
3. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: [пер. с англ.] / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер. – Радио и связь, 1986. – 448 с.
4. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
5. Подавление помех в антенных решетках с ограниченным числом каналов адаптации / М.Р. Бибарсов [и др.] // Информация и Космос. – 2015. – № 3. – С. 17–22.
6. Электромагнитные поля и волны / М.Р. Бибарсов [и др.] ; под ред. Б.В. Сосунова. – СПб, ВАС, 2014. – 200 с.

7. Боговик, А. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки / А.В. Боговик, В.В. Игнатов. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.

8. Оптимальная обработка сигналов в адаптивных антенных решетках систем радиосвязи, радионавигации и радиолокации / М.Р. Бибарсов [и др.] // Радиоэлектроника. – 2011. – № 6. – С. 22–26.