

УДК 621.396

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННЫМИ РЕШЁТКАМИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

П. Н. Башлы, Ю. А. Кузнецов

*Ростовский военный институт ракетных войск,
344038, г. Ростов-на-Дону, просп. М. Нагибина, 24/50
E-mail: bpn973@mail.ru*

Предложен модифицированный квазиоптимальный метод управления многоэлементной антенной решёткой, основанный на оптимизации её интегральных параметров при управлении комплексными амплитудами токов в части излучателей решётки. Выполнены расчёты, подтвердившие аналитические оценки значительного снижения вычислительных затрат.

Ключевые слова: вычислительные затраты, отношение сигнал/помеха + шум, антенная решётка, оптимизация.

Введение. Антенные решётки (АР) становятся неотъемлемой частью современных радиоэлектронных систем (РЭС), поскольку обладают потенциалом расширения функциональных возможностей РЭС [1]. Преимущество АР в качестве антенной системы в составе РЭС проявляется в способности гибко управлять формой диаграммы направленности (ДН) в зависимости от характера решаемых задач за счёт изменения комплексных амплитуд токов в излучателях.

Существующие методы синтеза АР [1–3] являются эффективными применительно к малоэлементным АР. В этом случае решается задача управления амплитудно-фазовым распределением во всех элементах решётки. Для многоэлементных АР управление всеми элементами решётки не требуется [4], а его реализация связана со значительными вычислительными затратами, которые не позволяют АР гибко реагировать на изменяющиеся условия функционирования, например появление помеховых сигналов.

В [4] описан метод квазиоптимального управления АР, предполагающий сокращение числа управляемых элементов в составе решётки и вычислительных затрат при решении задачи синтеза. Однако в случаях, когда в составе АР тысяча и более элементов, данный метод не позволяет решать такую задачу в реальном масштабе времени и требует значительных вычислительных затрат.

Целью представленной работы является обоснование критерия определения расположения регулируемых элементов АР при сокращении вычислительных затрат до заданного уровня.

Квазиоптимальное управление АР. Предложенный в [5] метод квазиоптимального синтеза основан на объединении части элементов решётки (M элементов) в группу с общим комплексным током I^0 , который далее определяется совместно с комплексными токами оставшейся части $N - M$ элементов АР в результате решения задачи синтеза. При этом отношение эрмитовых форм, к которому приводится выбранный функционал (например, отношение сигнал/помеха + шум (ОСПШ)), преобразуется к виду

$$\chi(J^\Delta) = \frac{J^{\Delta*} \mathbf{A}^\Delta J^\Delta}{J^{\Delta*} \mathbf{B}^\Delta J^\Delta} = \frac{J^{\Delta*} \mathbf{Y}^* \mathbf{A} \mathbf{Y} J^\Delta}{J^{\Delta*} \mathbf{Y}^* \mathbf{B} \mathbf{Y} J^\Delta}, \quad (1)$$

где $\mathbf{A} = f^{*0} f^0$ — эрмитова матрица порядка N , $f^0 = (f_1(u), f_2(u), \dots, f_N(u))$ — вектор-строка со значениями парциальных диаграмм системы $f_n(u)$ в направлении $u = u_0$; \mathbf{B} — эрмитова положительно-определённая матрица порядка N ; «*» — символ комплексного сопряжения скалярной величины и эрмитова сопряжения матрицы;

$$\mathbf{A} = f^{\Delta*} f^{\Delta}, \quad f^{\Delta} = (f_1(u), f_{N-M}(u), \Phi(u)); \quad J^{\Delta} = (J_1, \dots, J_{N-M}, I^0)^T; \quad (2)$$

$$b_{s,p}^{\Delta} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega} f_s^{\Delta}(u)^* f_p^{\Delta}(u) W(u) du, \quad s, p = 1, 2, \dots, N - M + 1; \quad (3)$$

$$\Phi(u) = \sum_m f_m(u) \exp(-j\varphi_m), \quad m = N - M + 1, \dots, N; \quad (4)$$

$W(u)$ — функция распределения шумов и помех; \mathbf{Y} — прямоугольная матрица преобразований размера $N \times N - M + 1$;

$$\varphi_n = \left(n - \frac{N + 1}{2} \right) \frac{2\pi}{\lambda} y_0 \sin u_0$$

(здесь λ — длина волны, y_0 — шаг решётки, u_0 — заданное направление приёма сигнала, $u \in \Omega$, Ω — область излучения антенны).

Решением задачи синтеза [4] при условии, что матрица \mathbf{A}^{Δ} первого ранга, является вектор комплексных амплитуд токов, определяемый выражением

$$J^{\Delta} = \mathbf{B}^{\Delta^{-1}} f^{\Delta*}. \quad (5)$$

Как показано в [5], объединять в группу нерегулируемых необходимо те элементы, комплексные амплитуды токов которых отличаются минимально друг от друга, т. е. имеют минимальную дисперсию токов.

В данной работе в отличие от [4, 5] раскрыв АР делится произвольно на P ($1 < P \leq \leq N/2$) подрешёток с числом элементов в каждой $M_p = |\mathfrak{R}^p|$ ($p = 2 \dots P$, $|\mathfrak{R}^p|$ — мощность множества \mathfrak{R}^p). В состав таких подрешёток входят элементы R_m^p , которые представляют собой элементы упорядоченных по возрастанию множеств \mathfrak{R}^p , содержащих номера элементов АР, объединённых в подрешётку ($\mathfrak{R}^0 \not\subset \mathfrak{R}^1 \not\subset \mathfrak{R}^2 \not\subset \dots \not\subset \mathfrak{R}^{P-1} \not\subset \mathfrak{R}^P$, \mathfrak{R} — множество номеров всех элементов АР, \mathfrak{R}^0 — множество номеров элементов АР, не участвующих в объединении (с независимым формированием комплексных токов)). Комплексные весовые коэффициенты (КВК) в M_p элементах равны произведению их исходных весовых коэффициентов на общий для этих элементов КВК I_p , который находят из решения задачи синтеза. Определение величины КВК и выбор нерегулируемых элементов АР происходит в результате последовательного решения задачи максимизации отношения эрмитовых форм с использованием теоремы об экстремальных свойствах пучка эрмитовых форм [6].

Таким образом, исходный функционал (1) преобразуется к виду

$$\chi(X) = \frac{X^* \Pi^* \mathbf{A} \Pi X}{X^* \Pi^* \mathbf{B} \Pi X}, \quad (6)$$

где X — искомый вектор токов; $\Pi = \prod_{p=1}^P \mathbf{Y}_p$ — матрица преобразования, множители которой определяются как

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^1| \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^1| \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^p| & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^p| & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

здесь \mathbf{Y}_p — прямоугольная матрица преобразования p -й группы размера $N \times N - |\mathfrak{R}^1| + 1 \left(N - \sum_{l=1}^{p-1} |\mathfrak{R}^l| + p - 1 \times N - \sum_{l=1}^p |\mathfrak{R}^l| + p \right)$.

Выбор элементов АР, участвующих в каждом p -м преобразовании, осуществляется до решения задачи максимизации функционала

$$\chi(X_p) = \frac{X_p^* \mathbf{Y}_p^* \mathbf{A} \mathbf{Y}_p X_p}{X_p^* \mathbf{Y}_p^* \mathbf{B} \mathbf{Y}_p X_p}. \quad (7)$$

Таким образом, в общем случае для произвольного числа подрешёток матрица преобразований Π принимает вид

$$\Pi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^P| & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^P| & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1/|\mathfrak{R}^{P-1}| & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1/|\mathfrak{R}^{P-1}| & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^1| \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1/|\mathfrak{R}^1| \end{bmatrix}. \quad (8)$$

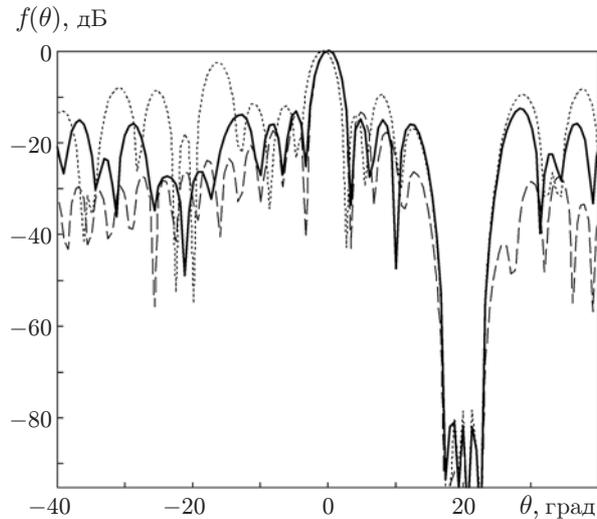


Рис. 1. Диаграммы направленности АР при различных способах синтеза

Результаты численного моделирования. При проведении численного эксперимента была использована АР ненаправленных элементов со следующими параметрами: количество элементов $N = 49$, $y_0 = 0,5\lambda$, $u_0 = 0$, $W(u) = \begin{cases} 10^6 & \text{при } 17,31 \leq u \leq 22,50, \\ 1 & \text{при других } u. \end{cases}$

На рис. 1 представлены графики ДН АР, синтезированные методом из [7] (штриховая кривая), методом из [4] с объединением элементов АР в одну группу $M = 21$ элемент (пунктирная кривая), а также предлагаемым методом с объединением элементов АР в три группы по $M_p = 7$ элементов (сплошная кривая). Из анализа графиков следует, что все три метода позволяют сформировать значительный (примерно -80 дБ) провал в направлении помехового сигнала. Однако при синтезе ДН с использованием известного метода [4] уровень боковых лепестков увеличивается и достигает -2 дБ, что не приемлемо для практических приложений. Синтез ДН предложенным методом обеспечивает не только сравнительно низкий уровень боковых лепестков, но и увеличение ОСПШ.

Таблица 1

| Метод синтеза ДН АР | ОСПШ, дБ | КНД, дБ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|
| Равномерное амплитудное и линейное фазовое распределения | $-22,3073$ | $21,8388$ |
| Оптимальный синтез [7] | $21,641$ | $21,6753$ |
| Квазиоптимальный синтез с формированием одной группы из 21 элемента [4] | $15,8447$ | $15,9646$ |
| Квазиоптимальный синтез с формированием трёх групп по 7 элементов с учётом расположения элементов (предлагаемый метод) | $20,245$ | $20,4398$ |
| Квазиоптимальный синтез с формированием трёх групп по 7 элементов без учёта расположения элементов | $20,127$ | $20,2839$ |

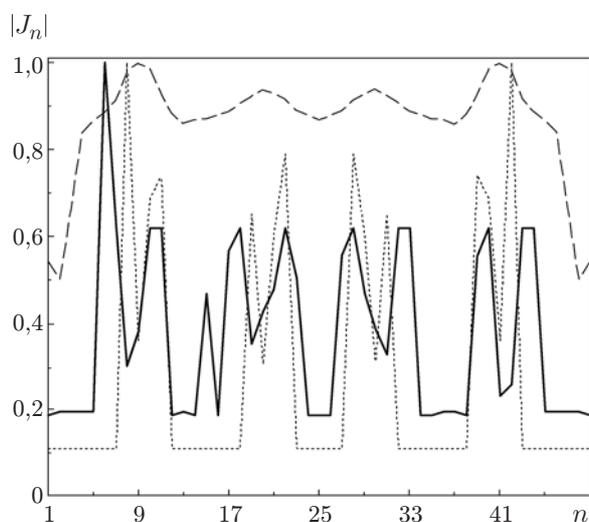


Рис. 2. Распределение амплитуд комплексных токов в элементах АР

Значения исследуемых параметров АР при различных методах синтеза приведены в табл. 1. Квазиоптимальный синтез с объединением в группу 21 элемента АР снижает ОСПШ и коэффициент направленного действия (КНД) примерно на 6,8 дБ по сравнению с оптимальным синтезом. При синтезе ДН решётки модифицированным методом квазиоптимального синтеза ОСПШ повышается до 20,2 дБ, что только на 1,5 дБ меньше, чем при оптимальном синтезе.

При синтезе ДН АР методом, аналогичным предложенному, но без учёта оптимального расположения элементов, т. е. когда элементы АР объединяются в три последовательно расположенные группы элементов (с 15 по 21, с 22 по 28 и с 29 по 35), результат синтеза хуже, что свидетельствует о целесообразности формирования групп элементов по критерию минимума дисперсии комплексных токов в каждой группе [4].

На рис. 2 представлены графики распределения нормированных амплитуд комплексных токов в элементах АР при синтезе ДН рассматриваемыми методами (обозначения кривых соответствуют обозначениям рис. 1).

Расчёт вычислительных затрат. Реализация алгоритмов синтеза ДН АР предполагает широкое использование ЭВМ для непосредственных расчётов в режиме реального времени. При расчёте вычислительных затрат учтено, что наибольшие из них при определении значений токов в элементах АР связаны с обращением матрицы \mathbf{B} [8].

Таблица 2

| Метод синтеза ДН АР | Относительные вычислительные затраты на реализацию методов синтеза |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Оптимальный синтез [7] | 1 |
| Квазиоптимальный синтез с формированием одной группы из 21 элемента [4] | 0,21 |
| Квазиоптимальный синтез с формированием трёх групп по 7 элементов с учётом расположения элементов (предлагаемый метод) | 0,25 |

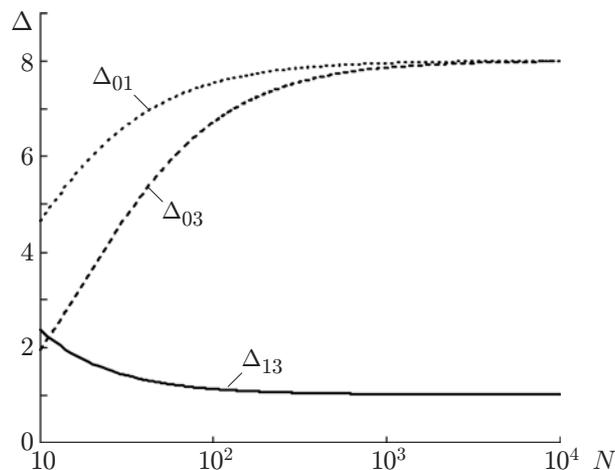


Рис. 3. Оценка вычислительных затрат

Относительные оценки вычислительных затрат при различных вариантах синтеза приведены в табл. 2. Из анализа таблицы следует, что вычислительные затраты при синтезе ДН АР предложенным методом выше, чем при синтезе ДН с объединением элементов АР в одну группу. Однако нельзя не заметить, что эти затраты при синтезе ДН АР данными методами примерно в 4 раза меньше, чем при синтезе с независимым формированием комплексных токов.

На рис. 3 представлены графики зависимостей отношений вычислительных затрат при оптимальном и квазиоптимальном синтезе с одной группой элементов (пунктирная кривая) и тремя группами элементов (штриховая кривая) от общего числа элементов решетки N . Сплошная кривая отражает зависимость отношения вычислительных затрат, необходимых для квазиоптимального синтеза при объединении элементов АР в одну и три группы, от их общего числа (число объединяемых элементов принималось равным $N/2$).

Заключение. Рассмотренный в данной работе модифицированный метод квазиоптимального синтеза АР обладает важным преимуществом перед известными способами синтеза, заключающимся в существенном сокращении вычислительных затрат при незначительных ухудшениях параметров АР. Вместе с тем модификация метода синтеза позволила улучшить энергетические параметры АР по сравнению с известным методом квазиоптимального синтеза.

Численные эксперименты подтвердили преимущества предложенного метода синтеза. Развитый в данной работе подход к выбору нерегулируемых элементов АР даёт возможность в значительной степени повысить помехоустойчивость информационной системы, а также исключает выбор заведомо неоптимальных вариантов решения задачи квазиоптимального синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проблемы** антенной техники /Под ред. Л. Д. Бахраха, Д. И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1989. 368 с.
2. **Зелкин Е. Г., Соколов В. Г.** Методы синтеза антенн. М.: Сов. радио, 1980. 296 с.
3. **Cheng D. K.** Optimization techniques for antenna arrays // Proc. IEEE. 1971. **59**, N 12. P. 1664–1674.

-
4. **Башлы П. Н., Кузнецов Ю. А., Гладушенко С. Г.** Квазиоптимальное управление многоэлементными антенными решетками // Автометрия. 2009. **45**, № 6. С. 15–21.
 5. **Башлы П. Н.** Квазиоптимальное управление антенной решеткой в задаче повышения помехоустойчивости информационно-измерительной системы // Автометрия. 2008. **44**, № 4. С. 52–59.
 6. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.
 7. **Пат. 2123743 РФ.** Способ формирования нуля диаграммы направленности фазированной антенной решетки /Б. Д. Мануилов, П. Н. Башлы, С. Г. Гладушенко. Оpubл. 20.12.1998, БИ № 35.
 8. **Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В.** Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1994. 544 с.

Поступила в редакцию 2 августа 2010 г.
