

УДК 621.396.67.73:519.6

ВЕСОВАЯ (ОКОННАЯ) ФУНКЦИЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ДОЛЬФА-ЧЕБЫШЕВА

В. В. Яковленко

«Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи», Федеральный
научно-производственный центр, 344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130

Статья поступила в редакцию 1 августа 2017 г.

Аннотация. Предложена новая весовая функция (ВФ) на основе оптимальной ВФ Дольфа-Чебышева, расширяющая её возможности получения требуемых характеристик диаграмм направленности (ДН) эквидистантных антенных решёток (АР). Новая ВФ обеспечивает регулируемое снижение уровня дальних боковых лепестков ДН и токов элементов на краю АР, повышение уровня сигнала, излучаемого активной АР, при ограниченном уровне сигналов её элементов; позволяет управлять скоростью спадания ближних боковых лепестков и положением нулей огибающей боковых лепестков. Новая ВФ сохранила характерные для исходной ВФ удобное регулирование уровня боковых лепестков и близкую к минимальной ширину основного лепестка ДН. Она может быть также использована для цифровой и аналоговой фильтрации сигналов трансверсальными (нерекурсивными) фильтрами и дискретного Фурье-анализа, для повышения уровня сигнала и уменьшения дифракционных искажений встречно-штыревого преобразователя (ВШП) узкополосного фильтра на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Ключевые слова: антенная решётка, диаграмма направленности, весовая функция, функция Дольфа-Чебышева.

Abstract. A new weight function (WF) was proposed. It is based on the optimal Dolph-Chebyshev WF and extends its capabilities to obtain the required characteristics of the radiation patterns (RP) of equidistant antenna arrays (AA). It provides a controlled reduction of distant side lobe of RP and of current of elements at the edge of AA, increasing the level of the signal emitted by an active AA with a

limited level of signals of its elements; it allows to control the speed of decreasing of the hither side lobes and the position of zeros of envelope of the side-lobe. The new WF preserves properties of original WF: regulation of level of side lobes and proximity to a minimum of width of the main lobe of RP. It can be used for digital and analog signal filtering by transversal (nonrecursive) filters, discrete Fourier analysis, increasing the signal level, decreasing diffraction distortion of interdigital transducer (IDT) of narrowband surface acoustic wave (SAW) filter.

Keywords: antenna array, radiation pattern, weight function, Dolph-Chebyshev function.

Введение

Формирование диаграммы направленности (ДН) с заданными характеристиками – одна из основных задач проектирования и эксплуатации современной радиосистемы с антенной решёткой (АР). При известном шаге расположения элементов АР, частоте сигнала и разности фаз соседних элементов, определяющей направление максимума ДН, форма ДН и её характеристики определяются распределением амплитуд токов антенных элементов (АЭ). Оно задаётся дискретным набором значений (отсчётов) весовой функции (ВФ) в точках расположения центров АЭ. В областях цифрового спектрального анализа и трансверсальных фильтров эту функцию называют оконной.

Основными требованиями к ДН являются ширина основного лепестка и уровень максимального бокового лепестка (УБЛ). Задают также скорость спадания боковых лепестков (БЛ) или форму их огибающей. Могут задаваться (для адаптивных решёток) положение нулей ДН или огибающей БЛ. Значения коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента использования поверхности (КИП) не ниже заданных также являются неявными требованиями к ДН и ВФ.

Требования минимальной ширины основного лепестка ДН, минимального УБЛ, быстрого спадания БЛ и высокого КИП при заданной

геометрии АР взаимосвязаны – улучшение одних характеристик ухудшает другие. Все они определяются выбором ВФ. Созданию ВФ, оптимальных по тем или иным критериям, посвящено большое число публикаций.

ВФ Дольфа-Чебышева [1] оптимальна [2,3] по двум основным критериям – она обеспечивает минимальный УБЛ при заданной ширине основного лепестка ДН и минимальную ширину основного лепестка при заданном УБЛ. Она считается одной из лучших ВФ и используется как эталон при анализе новых ВФ – как, например, в [4, 5], посвященных адаптивным ВФ. Она позволяет явно задавать требуемый УБЛ и несложно вычисляется на современных компьютерах. Однако две особенности этой ВФ, являющиеся следствием её оптимальности – одинаковый уровень всех БЛ и, при большом числе N элементов АР, значение на краях выше значения в центре – ограничивают её использование в реальных АР. Для использования этой ВФ в современных разработках необходимо, оставляя её близкой к оптимальной и сохраняя удобство пользования, обеспечить явную регулировку скорости спада ближних БЛ, уровня дальних БЛ и величины ВФ на краях.

Ниже предлагается новая ВФ, построенная на основе оптимальной ВФ Дольфа-Чебышева и обеспечивающая такие регулировки. Эта ВФ позволяет увеличить КИП и когерентное усиление решётки по сравнению с исходной ВФ Дольфа-Чебышева, что повышает уровень сигнала, излучаемого активной решёткой, при технически ограниченных мощностях её элементов; а её использование, например, в акустоэлектронике для аподизации ВШП позволяет увеличить амплитуду излучаемой ПАВ и уменьшить дифракционные искажения.

Ц е л ь р а б о т ы – построение ВФ, обеспечивающей получение ДН с заданными характеристиками, возможность регулирования амплитуд сигналов крайних элементов АР, уровня и скорости спада боковых лепестков ДН, повышения уровня сигнала решётки при ограниченном уровне сигнала отдельного элемента и управления положением нулей огибающей боковых

лепестков при сохранении, при данном УБЛ, ширины основного лепестка ДН близкой к минимальной, характерной для исходной ВФ Дольфа-Чебышева.

Р е ш а е м ы е з а д а ч и :

1 Исследование характера изменения ДН решётки при изменении величины крайних отсчётов функции Дольфа-Чебышева.

2 Исследование поведения дальних боковых лепестков ДН и высокоамплитудных крайних отсчётов ВФ при взвешивании АР линейной комбинацией функций Дольфа-Чебышева.

3 Построение новой регулируемой ВФ как линейной комбинации функций Дольфа-Чебышева с изменяемой величиной крайних отсчётов.

4 Анализ применения новой ВФ для повышения уровня сигнала активной АР.

5 Оценка оптимальности и удобства использования новой ВФ.

Весовая функция Дольфа-Чебышева и её ограничения

ВФ Дольфа-Чебышева $W_{N\beta}(k)$, рассматриваемая как математическая функция, отображает дискретное множество номеров отсчетов¹ $k=0,1,\dots, N-1$, обычно соответствующих неотрицательным целочисленным точкам оси абсцисс, на непрерывный отрезок $(0, 1]$ оси ординат – область значений ВФ, амплитуд² её отсчетов (рис. 1а). При числе отсчетов, превышающем несколько десятков, вычисление их амплитуд [6] неустойчиво из-за суммирования больших чисел с противоположными знаками. Поэтому в настоящее время эту ВФ принято вычислять [7] как обратное дискретное преобразование Фурье последовательности

$$F_m = \frac{\cos\{N \arccos[\alpha \cos(\pi m/N)]\}}{\operatorname{ch}[N \operatorname{arcch}(\alpha)]}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

¹ Соответствующих АЭ.

² Соответствующих токам АЭ.

где $\alpha = \text{ch}\left[\frac{\text{arcch}(\beta)}{N}\right]$, β – относительная амплитуда (уровень) бокового лепестка, далее задаваемая в децибелах.

Для нормировки рассматриваемой ВФ удобна норма Чебышева

$$\max_{k=0..N-1} (W_{N\beta}(k)) = 1, \quad (1)$$

используемая для остальных ВФ и автоматически учитывающая наличие верхней границы амплитуды тока отдельного элемента активной антенной решетки, или же, для приемной решетки, наличие АЭ, относительно которого сигналы других АЭ подвергаются аттенюации.

Величины N и β являются параметрами функции Дольфа-Чебышева и определяют вид зависимости амплитуд отсчетов от их номеров. Их изменение позволяет регулировать ширину основного лепестка ДН, далее кратко называемую шириной ДН (ШДН) и измеряемую на уровне половинной мощности (-3 дБ), и непосредственно задавать УБЛ. Такая возможность явного управления ДН удобна при проектировании АР в режиме диалога с компьютером и важна для обеспечения возможности перестройки её характеристик в режиме реального времени путем изменения малого числа параметров. На рис. 1а приведен график функции $W_{N\beta}(k)$ для значений $N = 20$ и $\beta = -40$ дБ (т. е. УБЛ составляет 0,01 амплитуды основного лепестка). Несмотря на дискретность области определения функции, точки ее графика принято соединять линией, аналогично непрерывным ВФ.

Шаг элементов антенной решетки считаем равным половине длины волны.

Для оценки качества ВФ, характеризующего напряженность поля, создаваемого АР в дальней зоне независимо от числа её элементов, будем использовать среднюю амплитуду (СА) отсчетов ВФ, называемую в [8] когерентным усилением (на один антенный элемент).

Рассмотрим подробнее две особенности ВФ Дольфа-Чебышева, в ряде случаев ограничивающих ее применение. Первой является одинаковый уровень

всех БЛ ДН $F(\theta)$ (рис. 1б), задаваемый параметром β . Это обеспечивает явное и простое задание важной характеристики ДН и особенное удобство использования данной ВФ, что выделяет ее среди других ВФ (кроме функции Кайзера-Бесселя), которые обычно не предоставляют такой возможности [9] или требуют подбора значения параметра для получения нужного их уровня, или же используют сложные методы синтеза ВФ и ДН по заданным требованиям.

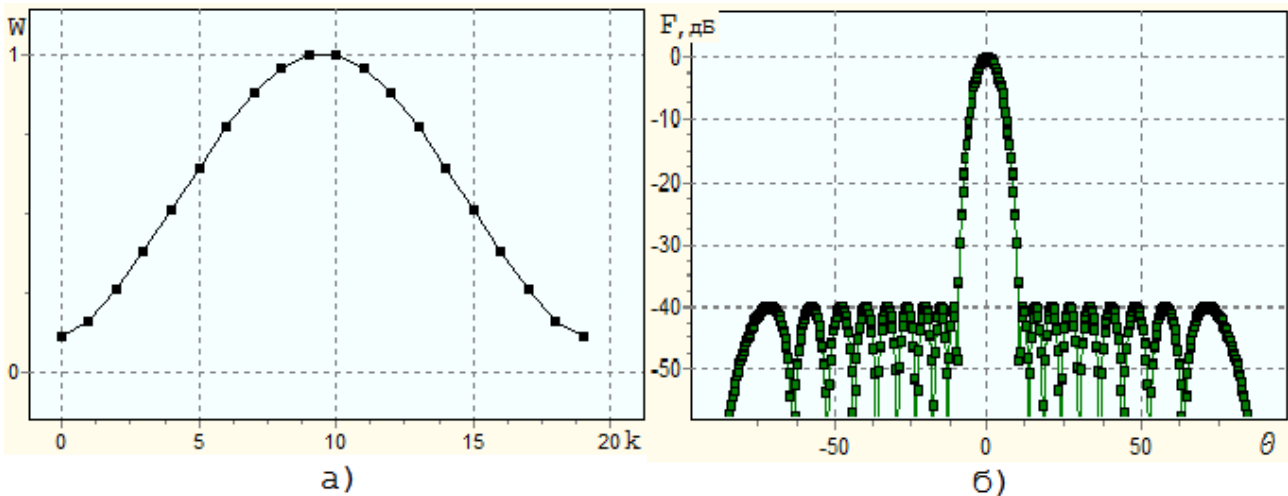


Рис. 1. ВФ Дольфа-Чебышева (а) для 20 отсчетов и УБЛ -40 дБ

(W – значение ВФ, k – номер отсчета) и соответствующая этой функции ДН (б) с шириной основного лепестка 7.14° (F – значение ДН, θ – угол)

Одинаковый уровень всех БЛ затрудняет использование этой ВФ в приложениях, где равномерная засветка фона нежелательна – в радиолокации, спектральном анализе. При большом числе БЛ одинакового уровня на них приходится значительная доля энергии. Поэтому актуальна модификация этой ВФ, обеспечивающая удобное задание уровня дальних лепестков ДН при сохранении уровня ближних лепестков и несущественном увеличении ширины основного лепестка (поскольку оптимальность исходной ВФ будет нарушена).

Второй особенностью является высокая амплитуда крайних отсчетов при большом N и/или высоком УБЛ (то и другое уменьшает ширину основного лепестка ДН). В этом случае большая часть элементов АР может работать неэффективно из-за низких амплитуд их токов (рис. 2б). Ситуация усугубляется

при эллиптической форме раскрыва, требующей увеличения амплитуды токов элементов на краях решетки для компенсации уменьшения числа элементов в ряду и/или колонне – например, при использовании метода [10].

С другой стороны, когда амплитуда токов на краях приближается к амплитуде в центре, но не превышает ее, это увеличивает КИП, СА отсчетов и уровень сигнала АР. Этим частично объясняется преимущество ВФ Дольфа-Чебышева (СА 0.565, ШДН 1.43° , рис. 2а), например, перед ВФ Хэмминга (СА 0.540, ШДН 1.49°) при прочих равных условиях ($N = 100$ и $\beta = -42.6$ дБ).

Считается, что АР с ВФ Дольфа-Чебышева обладают значительным реактивным полем, которое уменьшается при снижении амплитуды на краях и сглаживании ВФ [3] – как, например, при модификации, использованной в [11]. Очевидно, что уменьшение диапазона значений отсчетов ВФ также снизит относительную величину реактивного поля.

Следовательно, второй актуальной задачей является построение ВФ, по свойствам близкой к оптимальной функции Дольфа-Чебышева, но с амплитудой крайних отсчетов не выше амплитуды центральных и уменьшенным диапазоном её изменения. Ниже предлагаются два способа решения обеих задач и ВФ, объединяющая эти способы.

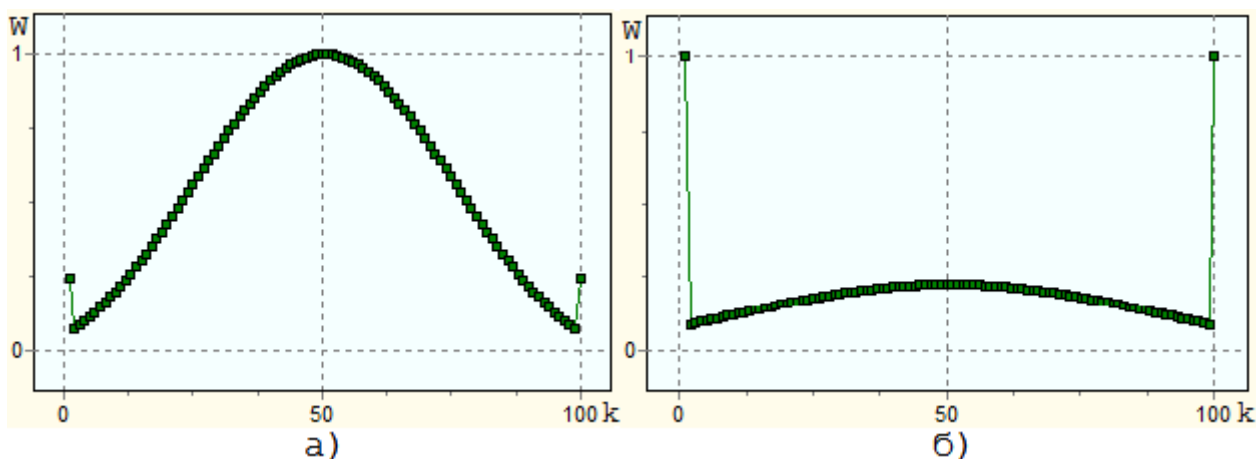


Рис. 2. ВФ Дольфа-Чебышева при числе отсчетов $N=100$:

а) с УБЛ -42.6 дБ, как у ВФ Хэмминга, но с лучшими характеристиками:

СА (0.565 вместо 0.54) и ШДН (1.43° вместо 1.49°);

б) с УБЛ -20.0 дБ, очень низкой СА (0.191), но малой ШДН (1.03°)

Первый способ

Эта коррекция функции Дольфа-Чебышева $W_{N\beta}(k)$ состоит в умножении величины её крайних отсчетов на положительный коэффициент R , являющийся третьим параметром модифицированной первым способом ВФ $W_{N\beta R}^{(1)}(k)$:

$$W_{N\beta R}(k) = W_{N\beta R}^{(1)}(k) = \begin{cases} W_{N\beta}(k), & k = 1, \dots, N-2 \\ RW_{N\beta}(k), & k = 0, N-1 \end{cases} \quad (2)$$

При $R < 1$ это приводит к снижению уровня дальних лепестков ДН, некоторому изменению (обычно повышению) уровня ближних лепестков относительно уровня, соответствующего параметру β исходной ВФ, и небольшому расширению главного лепестка. Эти изменения ДН плавно нарастают по мере уменьшения коэффициента R (при $R = 1$ новая функция совпадает с исходной) и слабо зависят от значений параметров N и β . Переход от рис. 1б к рис. 3а иллюстрирует изменение ДН при коррекции ВФ Дольфа-Чебышева первым способом с параметром $R = 0.5$ и неизменных значениях остальных параметров. При $R = 0$ эта ВФ переходит в ранее исследованный квазиоптимальный вариант ВФ Дольфа-Чебышева [3].

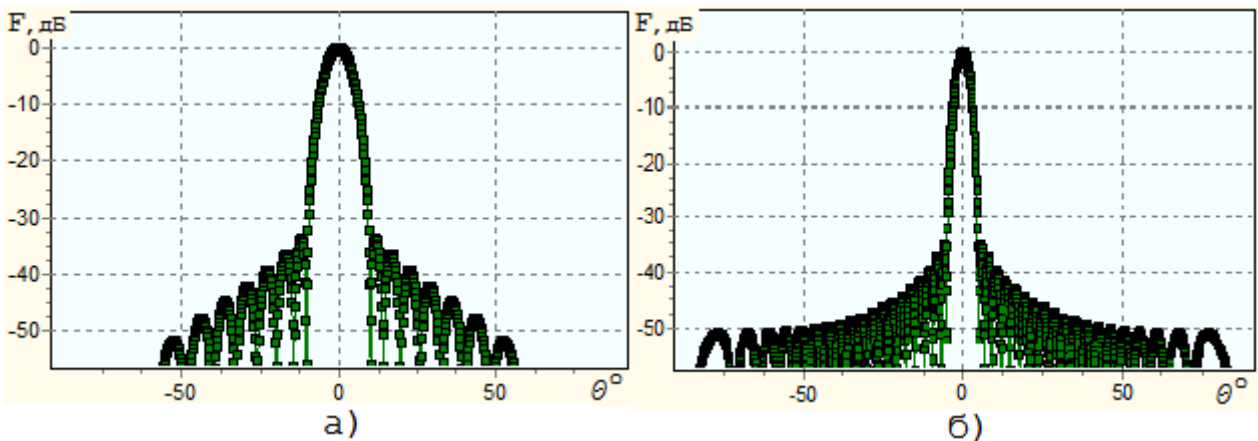


Рис. 3. ДН при коррекции ВФ Дольфа-Чебышева первым способом с параметрами $\beta = -40$ дБ и $R = 0.5$:

а) $N = 20$; УБЛ -33.8 дБ, ШДН 7.29° (сравните с рис. 1б, где $R = 1$);

б) $N = 40$; УБЛ -35.3 дБ, ШДН 3.56° ; на краю УБЛ -50.8 дБ

При большом числе отсчетов характер спада ближних и дальних БЛ становится различным: вблизи главного лепестка уровень БЛ быстро понижается и затем остается почти постоянным, но ниже уровня, определяемого параметром β исходной функции (рис. 3б).

При $R > 1$ наблюдается обратный эффект – рост уровня дальних лепестков, небольшое снижение уровня ближних лепестков и уменьшение ширины главного лепестка.

Таким образом, коррекция первым способом позволяет устранить или существенно уменьшить обе указанные выше особенности функции Дольфа-Чебышева.

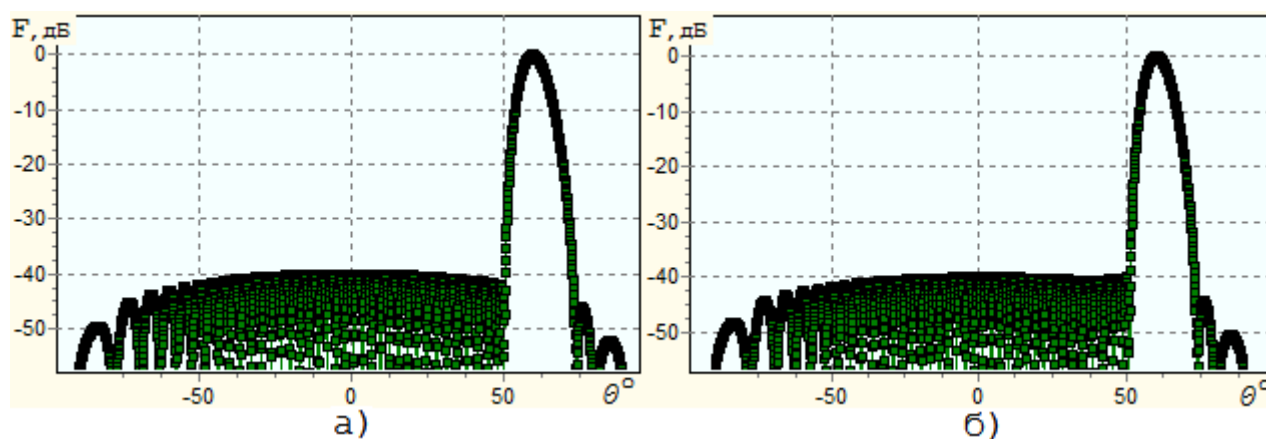


Рис. 4. ДН АР (УБЛ -40.0 дБ) до и после коррекции ВФ первым способом для уменьшения влияния направленности АЭ:

а) до ($\beta = -43$ дБ): ШДН 7.16° , СА 0.5564;

б) после ($R = 0.925$, $\beta = -42$ дБ): ШДН 7.10° , СА 0.5625 – стало лучше.

Рассмотрим пример использования такой коррекции. Смысл параметров ВФ очевиден, их влияние на ДН практически независимо. Поэтому в режиме диалога (например, в среде MATLAB) несложно подобрать значения, обеспечивающие получение нужной ДН.

Известно (если пренебречь взаимным влиянием АЭ, наличием экрана и т.п.), что ДН АР является произведением множителя решетки и ДН отдельного АЭ, близкой к $\cos(\vartheta)$. При отклонении луча от нормали к решётке ДН АЭ увеличивает УБЛ антенны вблизи нормали, что приходится компенсировать

уменьшением параметра β , расширяющим основной лепесток ДН. Для сохранения УБЛ -40 дБ при отклонении луча на 60° необходимо задать $\beta = -43$ дБ (см. фрагменты «а» рис. 4 и 5, для 40-элементной ФАР). Изменением параметров R и β можно уменьшить вариации УБЛ и ширину основного лепестка и повысить СА ВФ при сохранении исходного УБЛ, как показано на фрагментах «б» и «в» тех же рисунков. И до, и после коррекции ВФ её ШДН и СА остаются лучше этих же характеристик ВФ типа Хэмминга (ШДН 7.33° , СА 0.542) с тем же числом отсчетов и УБЛ (пьедестал 0.084).

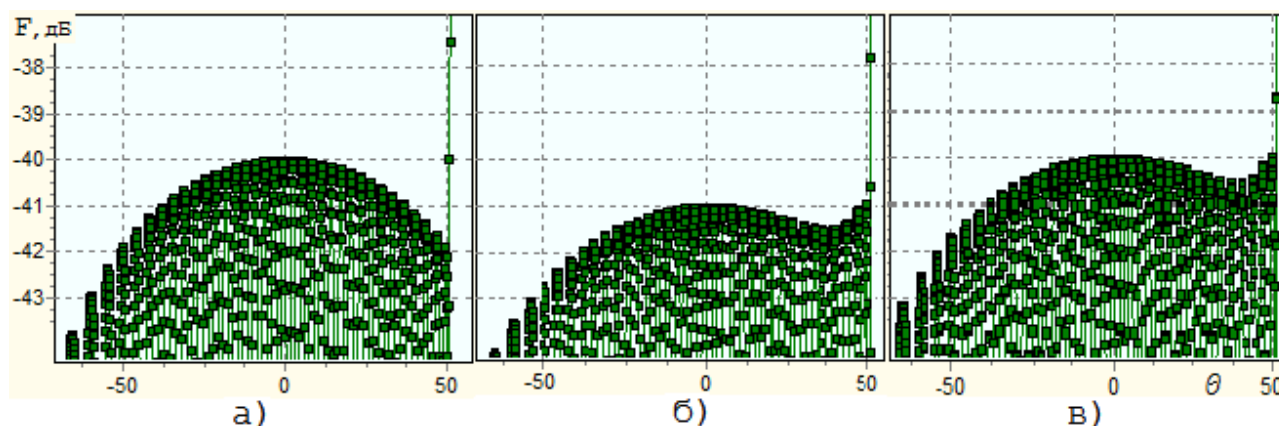


Рис. 5. Боковые лепестки ДН антенной решетки на этапах коррекции ВФ,

изображенной на рис. 4: а) исходная ВФ: $\beta = -43$ дБ, $R = 1.000$;

б) промежуточный этап: $R = 0.925$ (уменьшение на 0.075);

в) окончательная ВФ: $\beta = -42$ дБ (увеличение на 1 дБ)

Второй способ

Эта модификация функции Дольфа-Чебышева основана на близости положения и уровня, но противоположности знаков дальних лепестков ДН двух ВФ, число отсчетов которых отличается на два, а остальные параметры совпадают (рис. 6). Полусумма таких ДН имеет низкий уровень дальних лепестков (рис. 7). Это позволяет преодолеть первую особенность ВФ Дольфа-Чебышева – постоянство уровня всех лепестков.

Для взаимной компенсации электромагнитных полей в дальних лепестках обеих ДН требуется детальный расчет вкладов отдельных ВФ (см. ниже

формулу (3)), а пока будем считать, что N достаточно велико, чтобы можно было просто сложить две ВФ (для N и $N-2$ отсчетов) и нормировать сумму.

При реализации антенной системы имеется свобода выбора относительного расположения двух наборов излучателей (и соответствующих ВФ на оси x), волновые поля дальних лепестков которых компенсируются в дальней зоне, как у ДН на рис. 6 и 7. Суммарная ВФ должна допускать использование АР в режиме сканирования – следовательно, эффект компенсации дальних лепестков ДН не должен зависеть от направления фазирования. Кроме того, желательно реализовать обе ВФ с помощью одних и тех же АЭ. Все это обеспечивается совмещением центров симметрии ВФ и равенством периодов решеток.

Для получения суммарной ВФ каждый из $N - 2$ отсчетов ВФ меньшего размера (его номер k) совместим с соответствующим его положению отсчетом (номер $k + 1$) из центральных $N - 2$ отсчетов N -точечной ВФ бóльшего размера. Отметим, что теперь критичные высокоамплитудные крайние отсчеты суммируемых ВФ не совпадают и приходятся на соседние отсчеты суммарной ВФ. Амплитуды совмещенных отсчетов сложим, амплитуды крайних отсчетов ВФ бóльшего размера оставим без изменения. После нормировки (1) амплитуды критичных отсчетов снижаются примерно вдвое (рис. 8а, 8б вверху). Таким образом, модификация вторым способом позволяет существенно уменьшить также влияние второй особенности ВФ Дольфа-Чебышева – снизить высокую амплитуду отсчетов на краю. Уширение основного лепестка ДН невелико – не более $1/N$ – и он остается почти как при исходной ВФ.

Точные значения весовых коэффициентов при суммируемых функциях найдем из условий нормировки ВФ и равенства модулей напряженности электромагнитных полей дальних боковых лепестков. Поскольку УБЛ обеих функций совпадают, то весовые коэффициенты обратно пропорциональны суммам амплитуд отсчетов ВФ.

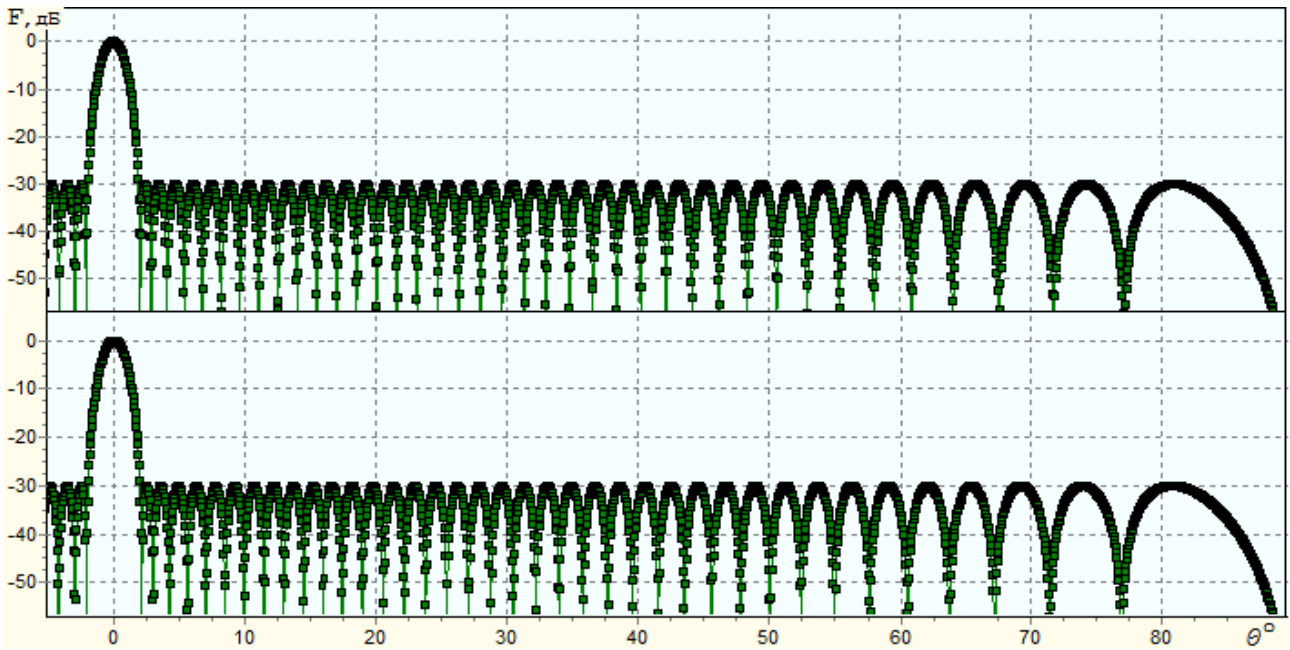


Рис. 6. ДН при ВФ Дольфа-Чебышева с $\beta = -30$ дБ и $N = 80$ (вверху) и $N = 78$ (внизу)

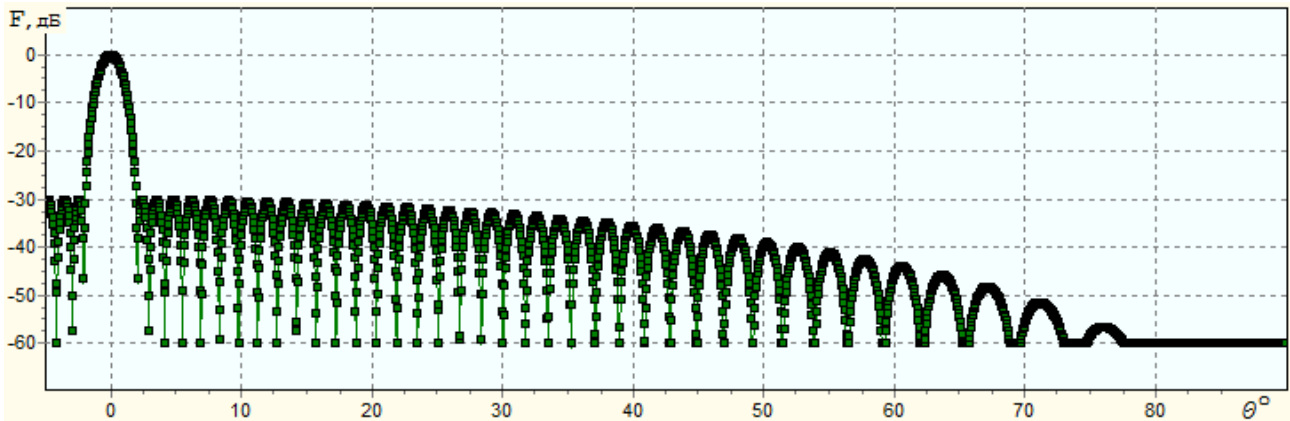


Рис. 7. Полусумма ДН, изображенных выше:
скомпенсированы дальние лепестки

Такое суммирование двух ВФ Дольфа-Чебышева несложно обобщается на любое число S функций от 1 до $N - 2$, в том числе нечетное и нецелое – при договоренности, что функция с минимальным числом отсчетов входит в сумму с дополнительным коэффициентом, равным дробной части параметра S . Естественно, число отсчетов функций должно быть отрезком убывающей арифметической прогрессии с шагом 2, начинающейся с N . Обозначим нормированную сумму таких функций как $W_{N\beta S}^{(2)}(k)$. Она является линейной

комбинацией «обычных» функций Дольфа-Чебышева $W_{N\beta}(k)$ и выражается формулой

$$W_{N\beta S}^{(2)}(k) = A_{N\beta S}^{(2)} \sum_{i=0}^{S^+-1} \frac{B_{Si}}{C_{N-2i\beta}^{(2)}} W_{N-2i\beta}(k), \quad (3)$$

где S^+ и S^- – значения S , округленные в большую (+) и меньшую (–) сторону,

$$B_{Si} = \begin{cases} S - S^- & \text{при } i = S^- \text{ и, одновременно, } \text{дробном } S \\ 1 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$C_{M\beta}^{(2)} = \sum_{j=0}^{M-1} W_{M\beta}(j) \text{ – сумма амплитуд всех } M=N-2i \text{ отсчетов}$$

функции $W_{N-2i\beta}(k)$,

$A_{N\beta S}^{(2)}$ – нормирующий (1) множитель,

$$\text{обеспечивающий } \max_{k=0..N-1} (W_{N\beta S}^{(2)}(k)) = 1.$$

Очевидно, что возможны и другие наборы коэффициентов, компенсирующие дальние БЛ каждой пары, или же единственной тройки [12], суммируемых функций. Например, можно увеличить вес пар ВФ с большим значением N и тем уменьшить ширину основного лепестка ДН и, возможно, увеличить СА. Отказ от равенства параметров β может обеспечить равенство ширины основных лепестков их ДН при УБЛ суммы, соответствующем некоторому промежуточному значению параметров β . Но поясним приведенную формулу.

Если число S нечетное и больше двух, то функция с минимальным N остается без пары и, соответственно, без компенсации дальних БЛ. Но и в этом случае их уровень снижается за счет снижения веса этой функции в линейной комбинации, а наибольшая взаимная компенсация достигается для лепестков, находящихся ближе к основному, формируя нуль огибающей БЛ.

Если параметр S не целый, то суммируется число функций, округленное в бóльшую сторону, но для последней функции используется коэффициент B_{Si} , равный дробной части S . Это обеспечивает непрерывность зависимости $W_{N\beta S}^{(2)}(k)$ от S . С другой стороны, такая функция является линейной комбинацией двух функций с ближайшими целыми значениями S^+ и S^- , что упрощает анализ положения нулей и минимумов огибающей БЛ.

На рис. 8 а-г в верхнем ряду изображены модифицированные вторым способом ВФ Дольфа-Чебышева для $N = 80$ отсчетов и числа $S = 1, 2, 4, 6$ суммируемых функций, причем случай «а» ($S = 1$) совпадает с исходной функцией Дольфа-Чебышева. Видно, что с ростом S амплитуда выброса на краю ВФ постепенно снижается, как бы распределяясь на S крайних отсчетов. Уменьшаются также и общие вариации амплитуды, снижая реактивные потери.

В нижнем ряду изображены соответствующие ДН. Видно, что при целых значениях параметра $S \geq 2$ огибающая БЛ имеет нули, а доля общей мощности, приходящаяся на БЛ, уменьшается с ростом S . Число нулей, считая в обе стороны от основного лепестка и учитывая цикличность ДН по углу, на единицу меньше S . При росте S от некоторого целого значения до значения на единицу больше на дальней от основного лепестка части огибающей БЛ появляется минимум, который, постепенно углубляясь, становится еще одним нулем огибающей, а имеющиеся нули придвигаются к основному лепестку – т.е. положения \mathcal{G}_m нулей (или минимумов) огибающей БЛ непрерывно зависят от параметра S . При $d = \lambda/2$ они описываются формулой

$$\mathcal{G}_m \approx \arcsin\left(\sin \mathcal{G}_0 \pm \frac{2m}{S}\right), \quad m \neq 0 - \text{целое,}$$

точной при целых значениях S и приближённой при дробных, где \mathcal{G}_0 – направление фазирования, а угол $\mathcal{G} = 0$ соответствует нормали к АР. Эта зависимость позволяет дополнительно снизить уровень помехи, направление на которую не слишком близко к направлению основного лепестка ДН, задавая

нужное значение параметра S . При этом ШДН и УБЛ остаются в пределах, известных заранее.

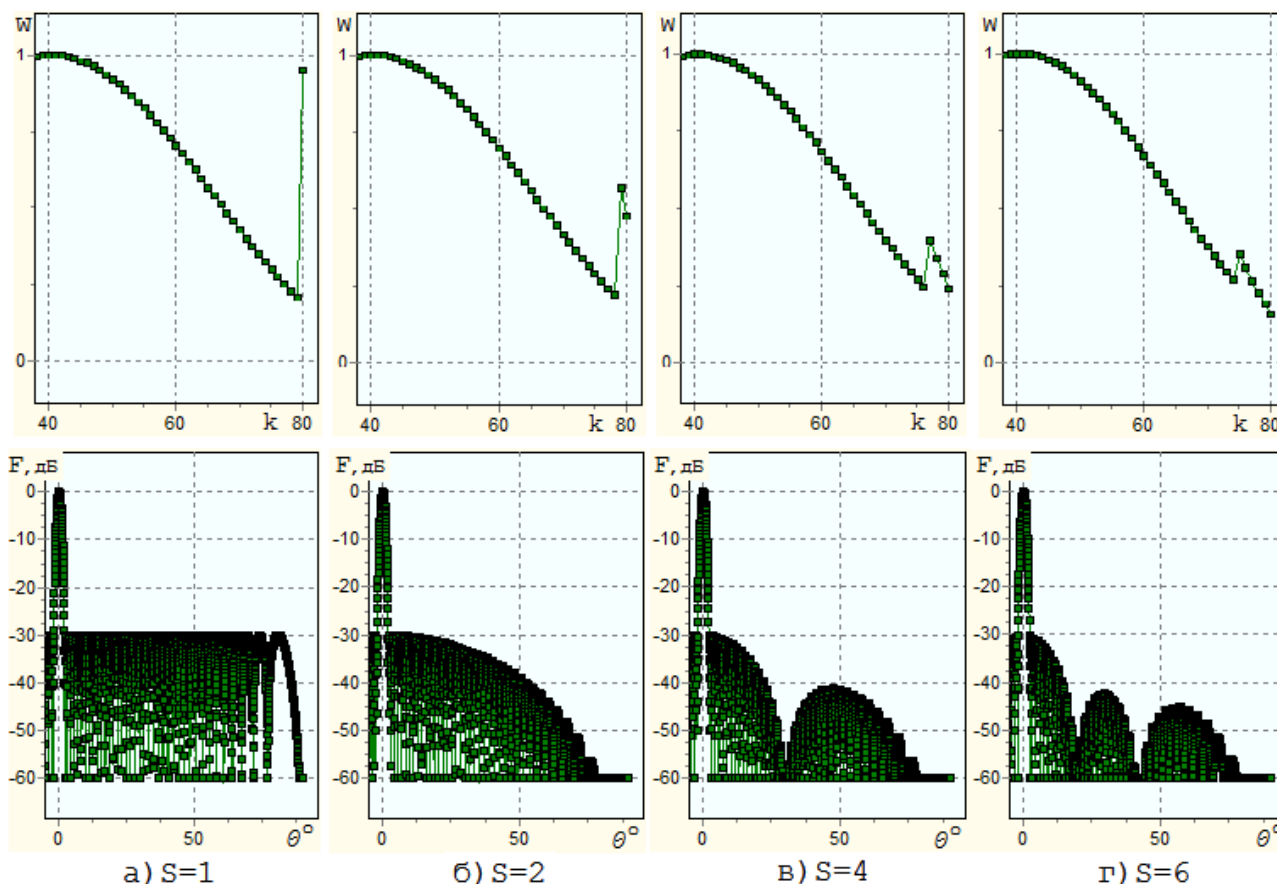


Рис. 8. Исходная (а) и просуммированные (б - г) ВФ Дольфа-Чебышева при $N_{\max} = 80$ отсчетах и УБЛ $\beta = -30$ дБ (вверху). Соответствующие им ДН (внизу). Указано число S суммируемых функций.

Как пример использования второго способа, снизим очень высокие амплитуды выбросов на краях ВФ (рис. 2б и 9а) до уровня ниже амплитуды в центре, причем так, чтобы неизбежное расширение основного лепестка ДН было по возможности минимальным³. Воспользуемся тем же инструментом моделирования, что и в первом способе. Необходимое снижение амплитуды выбросов достигается при значении $S = 7$, но можно использовать полуцелое значение $S = 7.5$ с более плавной ВФ и меньшим уровнем дальних БЛ. В результате резко возрастает площадь под графиком ВФ и растет

³ Иначе достаточно было бы просто понизить УБЛ.

пропорциональная ей СА (с 0.191 до 0.785), УБЛ чуть снижается (с -20 дБ до -20.36 дБ), ШДН немного увеличивается (с 1.03° до 1.10°). Небольшая коррекция β до величины -19.66 дБ, восстанавливающая исходное значение УБЛ, еще увеличивает величину СА до 0.792, что обеспечивает общий рост СА в 4.15 раза. ВФ и ДН до и после модификации изображены на рис. 9.

Следует отметить, что такой большой рост СА практически не изменяет КНД решетки (ширина луча увеличивается на 6.7 %, но уровень значительной части БЛ снижается на 10 - 20 дБ). Однако в случае активной решетки, когда имеется технический предел силы тока отдельного АЭ, использование второго способа позволяет при минимальном уширении луча относительно исходной оптимальной ВФ Дольфа-Чебышева существенно повысить энергетические возможности антенны. Возрастание силы тока почти всех АЭ значительно увеличивает плотность потока мощности на оси луча в дальней зоне (пропорционально квадрату суммы амплитуд отсчетов ВФ) – в данном случае примерно в 17 раз⁴.

При обычном подходе – например, квадрате косинуса на пьедестале 0.543, дающем тот же УБЛ -20 дБ – ШДН оказывается больше (1.13°), а СА меньше (0.772) достигнутых при втором способе (1.10° и 0.792 соответственно). Первый способ ($\beta = -19.53$ дБ, $R = 0.212$) также уступает второму, хотя и его результаты (ШДН 1.13° , СА 0.779) лучше обычного.

Если увеличение ШДН до 1.10° недопустимо, то для восстановления исходного значения 1.03° можно увеличить число отсчетов⁵ N со 100 до 106 и слегка подкорректировать параметр β до -19.70 дБ. Реальная ШДН при втором способе близка к ШДН ВФ Дольфа-Чебышева для $N - S$ отсчетов при том же значении параметра β .

⁴ Относительно ВФ, изображённой на рис. 9 а – неэффективной и потому не используемой; применённая модификация ВФ выводит её в лидеры.

⁵ Очевидно, что выбор числа АЭ и вида ВФ производится при проектировании АР.

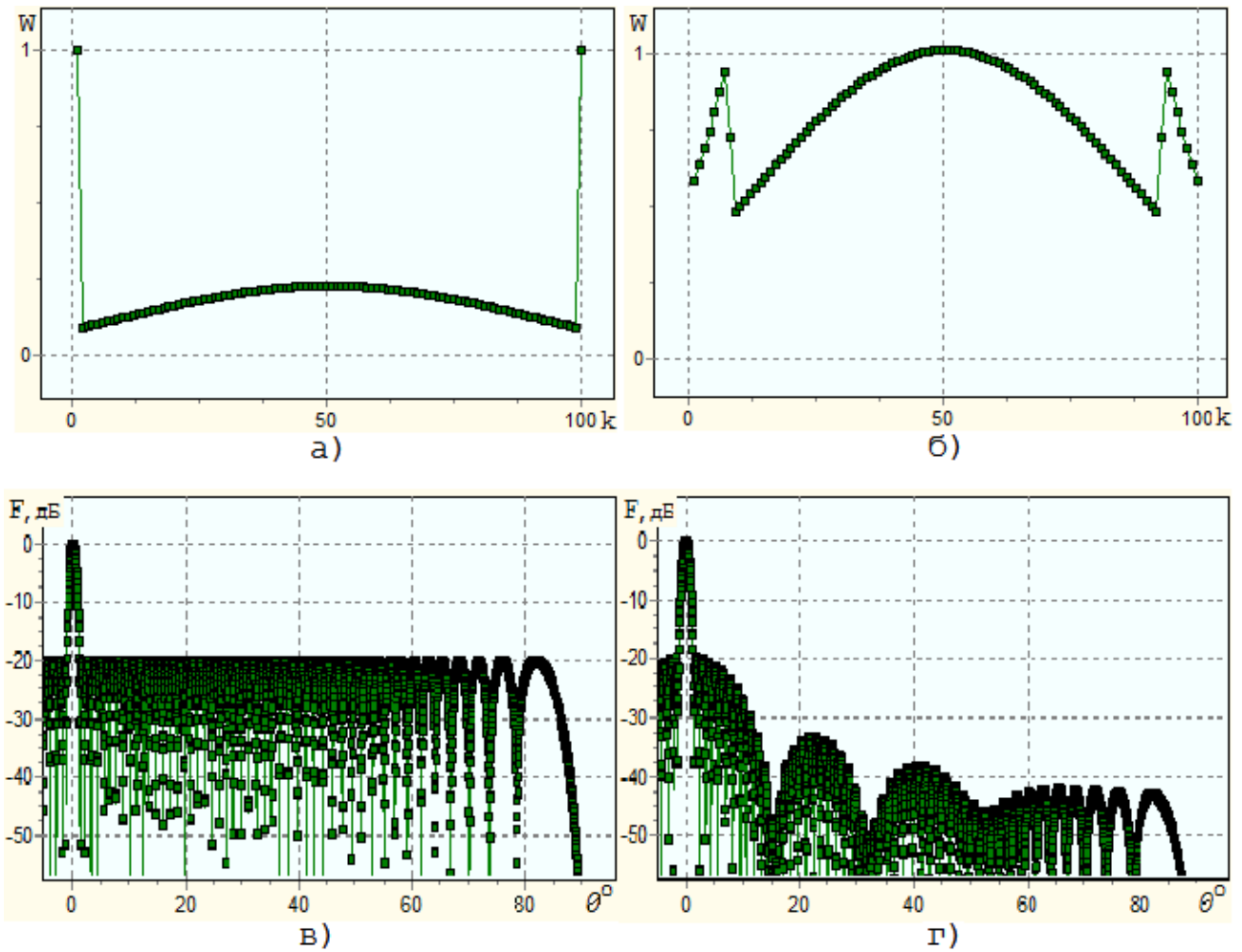


Рис. 9. ВФ (вверху) и ДН (внизу) до (слева) и после (справа) модификации функции Дольфа-Чебышева вторым способом. При том же максимальном токе АЭ излучаемая мощность возросла примерно в 17 раз, ШДН увеличилась всего на 6.7 %.

Новая ВФ, реализующая оба способа

Оба способа модификации ВФ Дольфа-Чебышева решают поставленные задачи и имеют свои преимущества. Для их объединения построим, аналогично (2) и (3), из функций, реализующих первый способ, линейную комбинацию по правилу второго способа:

$$W_{N\beta RS}(k) = A_{N\beta RS} \sum_{i=0}^{S^+-1} \frac{B_{Si}}{C_{N-2i\beta R}} W_{N-2i\beta R}(k), \quad (5)$$

где S^+ , S^- и B_{Si} – определяются по значению параметра S как в (3),

$W_{M\beta R}(k)$ – определённая в (2) функция, получаемая из ВФ Дольфа-

Чебышева для $M=N-2i$ отсчетов масштабированием в R раз её отсчетов номер 0 и $M-1$,

$$C_{M\beta R} = \sum_{j=0}^{M-1} W_{M\beta R}(j) - \text{сумма амплитуд всех } M \text{ отсчетов функции}$$

$$W_{M\beta R}(k),$$

$$A_{N\beta RS} - \text{нормирующий (1) множитель, чтобы } \max_{k=0..N-1} (W_{N\beta RS}(k)) = 1.$$

Новую функцию $W_{N\beta RS}(k)$, в соответствии со сложившейся практикой, можно назвать функцией Дольфа-Чебышева-Яковленко. Она является линейной комбинацией оптимальных [1] и квазиоптимальных [3] функций Дольфа-Чебышева. Отметим, что параметр β является общим для всех функций Дольфа-Чебышева, входящих в новую функцию; следовательно, при $R \neq 1$ УБЛ может отличаться от β . Рассмотренные примеры соответствуют частным случаям новой функции при значениях параметров $S=1$ в первом примере и $R=1$ во втором.

Изменения ДН при первом способе (рис. 1б и рис. 3) подобны умножению исходной равнолепестковой ДН на плавную функцию – огибающую БЛ (рис. 3), слабо зависящую от числа отсчетов. ДН при втором способе (рис. 8 и 9) определяется структурой формулы (3). Формула (5) имеет такую же структуру, но каждая исходная ВФ заменена на функцию, скорректированную первым способом, что близко к умножению ДН всей суммы на усреднённую плавную огибающую БЛ. Поэтому новая ВФ $W_{N\beta RS}(k)$ совпадает с оптимальной ВФ Дольфа-Чебышева при $R=S=1$ и предоставляет оба способа её коррекции: ДН второго способа для параметра S умножается на плавную функцию, задаваемую параметром R первого способа.

Получение ДН с заданными характеристиками

Для получения ДН нужного вида оптимально начинать с ВФ Дольфа-Чебышева, положив $R=S=1$, затем корректировать ВФ и ДН в желаемом

направлении, изменяя эти параметры, уточняя УБЛ параметром β и, в последнюю очередь, ШДН параметром N . При этом надо учитывать, что

- параметр β при $R=1$ равен УБЛ; изменение β плавно меняет УБЛ и ШДН;
- параметр N дискретно изменяет ШДН, при $R \neq 1$ немного изменяет УБЛ;
- параметр R масштабирует (в R раз) крайние S отсчетов ВФ, изменяет УБЛ и скорость спадания БЛ, немного изменяет ШДН;
- параметр S масштабирует (в $1/S$ раз) крайние S отсчетов ВФ, при $S \geq 2$ задает нули огибающей БЛ и снижает УБЛ между ними, при $S > 1$ немного увеличивает ШДН;
- наибольшие КИП, СА и когерентное усиление достигаются, когда максимальный из крайних S отсчетов ВФ приближается к единице, не превышая ее.

Таким образом, новая ВФ $W_{N\beta RS}(k)$ обеспечивает:

- простое, как у исходной ВФ Дольфа-Чебышева $W_{N\beta}(k)$, управление УБЛ и ШДН;
- ширину основного лепестка ДН, близкую к минимальной при данном УБЛ;
- среднюю амплитуду и КИП, близкие к максимальным при данных ШДН и УБЛ;
- приемлемую и управляемую величину крайних отсчетов ВФ;
- низкий уровень дальних боковых лепестков ДН при заданном уровне ближних;
- управление скоростью спадания боковых лепестков;
- управление положением нулей огибающей боковых лепестков;
- пониженный, по сравнению с исходной ВФ, уровень реактивного поля ;
- уменьшенный диапазон и бóльшую плавность изменения амплитуд отсчетов ВФ.

Эта 4-параметрическая ВФ является достаточно простым инструментом получения ДН с заданными свойствами и почти минимально возможной шириной основного лепестка. Она удобна для управления видом ДН при цифровом управлении антенной системой в режиме реального времени. Сконструированная из оптимальных и квазиоптимальных ВФ Дольфа-Чебышева, она не имеет ограничивающих особенностей этой функции и, следовательно, может использоваться шире. Кроме очевидного использования в нерекурсивных (трансверсальных) фильтрах при цифровой фильтрации и в качестве оконной функции при цифровом спектральном анализе, её применение, например, для аподизации узкополосных ВШП устройств на ПАВ [13] позволяет, за счет увеличения перекрытия большинства штырей ВШП (как на рис. 9б), существенно повысить уровень сигнала и уменьшить дифракционные искажения по сравнению с классической ВФ Дольфа-Чебышева (рис. 9а).

Выводы

1 Уменьшение величины первого и последнего отсчётов весовой функции Дольфа-Чебышева, задающих токи крайних элементов антенной решётки, позволяет понизить уровень дальних боковых лепестков диаграммы направленности и изменить скорость спада её ближних лепестков при малом изменении ширины основного лепестка.

2 Взвешенное суммирование двух функций Дольфа-Чебышева для N и $N-2$ отсчётов взаимно компенсирует дальние боковые лепестки диаграммы направленности и вдвое снижает высокие токи крайних элементов антенной решётки при малом изменении ширины основного лепестка диаграммы направленности.

3 Новая весовая функция, близкая к оптимальной функции Дольфа-Чебышева и сохраняющая её преимущества, обеспечивает и обобщает перечисленные возможности улучшения диаграммы направленности и распределения токов антенных элементов.

4 Новая весовая функция позволяет повысить когерентное усиление антенной решётки и коэффициент использования поверхности и увеличить мощность излучения активной решётки при ограниченной мощности отдельного элемента.

5 Новая функция, построенная на основе оптимальной весовой функции Дольфа-Чебышева и в частном случае совпадающая с нею, сохранила характерные для этой функции удобство задания уровня боковых лепестков диаграммы направленности и близкую к минимальной ширину основного лепестка и предоставила простые средства регулирования других характеристик диаграммы направленности и распределения токов антенных элементов.

Литература

1 *Dolph C. L.* A Current Distribution for Broadside Arrays which optimizes the Relationship between Beam Width and Side-Lobe Level. Proc. IRE. 1946. Vol. 34. P. 335.

2 Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника. 2003. 632 с.

3 *Зелкин Е. Г., Соколов В. Г.* Методы синтеза антенн. М.: Сов. радио. 1980. 294 с.

4 *Лайко К. А., Филимонова Ю. О.* Амплитудный синтез диаграмм направленности множителя антенной решетки с контролируемым законом распределения боковых лепестков // Докл. ТУСУРа. № 1 (31). Март 2014. С. 25 – 27.

5 *Давыдошкин В. М., Давыдошкина С. В.* Новый метод расчета эффективных весовых функций для спектрального анализа // Докл. 12-й Междунар. НТК «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж. 2006. Т. 3. С. 1662 – 1668.

6 *Кюн Р.* Микроволновые антенны. Л.: Судостроение. 1967. 518 с.

7 *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов / Пер. с англ. М.: Бином. 2006. 652 с.

8 *Кравченко В. Ф., Сафин А. Р., Кравченко О. В.* Булева алгебра и атомарные функции в задачах синтеза антенн // 3-я Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН. 26 – 30 октября 2009.

9 *Хэррис Ф. Дж.* Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. Т. 66. № 1. Январь 1978. С. 60 – 96.

10 *Волошин В. А., Ларин А. Ю., Оводов О. В.* Реализация заданного амплитудного распределения на плоском раскрыве ФАР с произвольной формой границы // Антенны. 2009. № 9(148). С. 12 – 16.

11 *Rao V. L. I.* Modified Dolph-Chebyshev arrays // Radio Science. 1968. Vol. 3. No. 5. P. 459 – 463.

12 *Дворкович В.П., Дворкович А.В.* Новые методы расчёта оконных функций Дольфа-Чебышева, Барсилона-Темеша и их модификаций. // Радиотехника и электроника, 2015, том 60, с. 369-385.

13 *Морган Д.* Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь. 1990. 415 с.

Ссылка на статью:

В. В. Яковленко. Весовая (оконная) функция на основе функций Дольфа-Чебышева. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug17/3/text.pdf>