

УДК 631.325.5 : 681.3

СИНТЕЗ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ С НУЛЕМ В ЗАДАННОМ НАПРАВЛЕНИИ СРЕДСТВАМИ КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИКИ

Е. П. Бочкарь, В. Е. Кульбеда, О. А. Судаков, В. О. Ягодин

Методом оптического моделирования рассмотрена задача синтеза диаграммы направленности антенны с нулем в заданном направлении. Приведены теоретические оценки, описание экспериментальных установок и результаты экспериментов, полученные при использовании оптических фильтров в виде фазовой маски, формируемой на основе акустооптической линии задержки или путем напыления тонкой диэлектрической пленки на прозрачную подложку.

Для адаптивных антенных систем характерна задача синтеза диаграммы направленности (ДН) с нулем в заданном направлении. Указанная задача может быть решена средствами когерентной оптики, которые находят применение для моделирования антенн СВЧ диапазона [1].

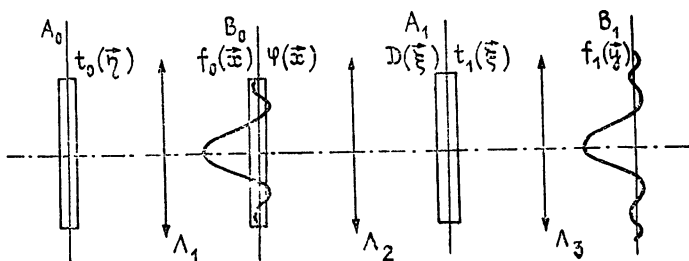


Рис. 1.

Принципиальная схема когерентного оптического процессора (КОП), выполняющего ряд вычислительных операций процедуры синтеза, приведена на рис. 1. Транспарант с функцией пропускания $t_0(\eta)$, соответствующей исходному распределению поля на апертуре антенны, освещается плоской монохроматической волной. Плоскости A_0 и B_0 являются фурье-сопряженными для линзы L_1 , поэтому в плоскости B_0 формируется пространственный спектр $f_0(x)$ транспаранта $t_0(\eta)$ [2], который с точностью до масштабных коэффициентов совпадает с исходной ДН антенны [1, 3]. В плоскости B_0 помещается оптический фильтр с функцией пропускания $\varphi(x)$, предназначенный для необходимого исправления исходной ДН $f_0(x)$. Плоскости A_0 и A_1 являются сопряженными для системы линз L_1, L_2 . Искомое распределение поля $t_1(\xi)$ находится в плоскости A_1 . Для выделения этого распределения в плоскости A_1 помещается диафрагма с функцией пропускания $D(\xi)$, соответствующей апертуре модели антенны в плоскости A_0 . Плоскости B_0, B_1 являются сопряженными для системы линз L_2, L_3 . Следовательно, в плоскости B_1 возникает синтезированная ДН $f_1(y)$. Достоинством

приведенной схемы является то, что ряд вычислительных операций процедуры синтеза, а именно, многократные преобразования Фурье, операция умножения $f_0(x)$ на $\varphi(x)$ и т. д. выполняются аналоговыми средствами практически мгновенно.

Синтезированное в КОП апертурное распределение поля $D(\xi)t_1(\xi)$, считанное в плоскости A_1 процессора и сформированное в раскрыве антенны, позволяет получить требуемую ДН антенны $f_1(y)$ с нулем в заданном направлении.

Для приведенной схемы синтеза ДН искомой является функция фильтра. В данной работе проводится исследование одномерной задачи синтеза. Пусть на отрезке $[-\pi, \pi]$ задано исходное распределение поля $t_0(\eta)$, которое связано с первоначальной ДН $f_0(x)$ преобразованием Фурье [3]

$$f_0(x) = (2\pi)^{-1} \int_{-\pi}^{\pi} t_0(\eta) \exp(ix\eta) d\eta, \quad \max_x |f(x)| = f(0) = 1. \quad (1)$$

Из приведенного описания схемы КОП следует, что синтезируемая ДН $f_1(x)$ связана с исходной ДН $f_0(x)$ и функцией фильтра $\varphi(x)$ с точностью до несущественных масштабных коэффициентов сверткой

$$f_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_0(x) \varphi(x) [\sin \pi(y-x)/\pi(y-x)] dx. \quad (2)$$

Искомая функция фильтра $\varphi(x)$ должна обеспечивать нулевую амплитуду ДН $f_1(x)$ в заданном направлении x_0 в области боковых лепестков при незначительных искажениях параметров главного луча ДН $f_1(x)$ по сравнению с исходной ДН $f_0(x)$.

Общий метод поиска $\varphi(x)$ для синтеза ДН с низким уровнем боковых лепестков предложен в [4]. В данной работе рассматривается возможность использования для решения указанной задачи синтеза наиболее простого по реализации фильтра, искажающего исходную ДН в небольшой окрестности выбранного направления. Оказывается, что в качестве такого фильтра может быть использована маска с резкими краями. Функция фильтра в этом случае определяется в виде

$$\varphi(x) = \varphi_0 [1 - 2\beta D((x-u)/\omega)], \quad (3)$$

где

$$D(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x| \leq 1, \\ 0 & \text{при } |x| > 1, \end{cases} \quad (4)$$

φ_0 — нормировочная константа, которая находится из условия пассивности фильтра:

$$\max_x \varphi_0 |1 - 2\beta D[(x-u)/\omega]|, \quad \varphi_0 > 0, \quad (5)$$

2β — амплитуда маски, 2ω — ее размер, u — координата центра маски.

Для функции фильтра (3) соотношение (2) преобразуется с точностью до нормировочной константы φ_0 в следующее:

$$f_1(x) = f_0(x) - 2\beta \int_{-\omega}^{\omega} f_0(y+u) \frac{\sin \pi(x-y-u)}{\pi(x-y-u)} dy. \quad (6)$$

Параметры маски выбираются из условия $f_1(x_0) = 0$ или

$$2\beta \int_{-\omega}^{\omega} f_0(y+u) \frac{\sin \pi(x_0-y-u)}{\pi(x_0-y-u)} dy = f_0(x_0). \quad (7)$$

Равенство (7) можно рассматривать как уравнение относительно одного из трех параметров маски: амплитуды, размера или местоположения, при фиксированных двух других параметрах. Тогда решение (7) дает закон перестройки одного (управляемого) параметра маски при изменении координаты формирования нуля ДН, что соответствует наиболее простому управлению фильтром.

На рис. 2 приведено решение уравнения (7) относительно β при $u = x_0$ для ДН антенны с равномерным распределением поля на апертуре

$$f_0(x) = \sin \pi x / \pi x \quad (8)$$

и размера маски, равного размеру бокового лепестка исходной ДН по нулям, $2\omega = 1$ [5]. Из рисунка видно, что существуют координаты нулей, для которых не выполняется условие (5) пассивности фильтра ($0 \leq \beta \leq 1$). Таким образом, не удается синтезировать точно нуль ДН, если регулировать только коэффициент пропускания фильтра в окрестности выделенного направления. Аналогичный вывод справедлив, если управлять только размером маски. Для выбранного условия $u = x_0$ остается возможность одновременно регулировать и размер и коэффициент пропускания маски.

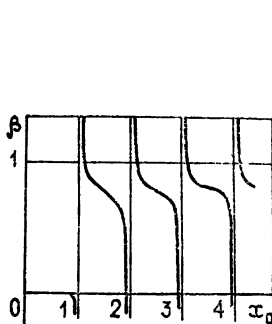
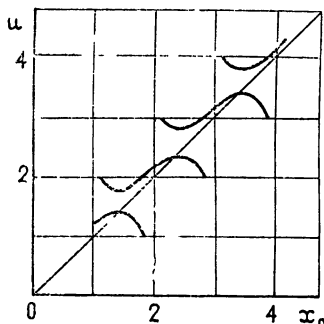
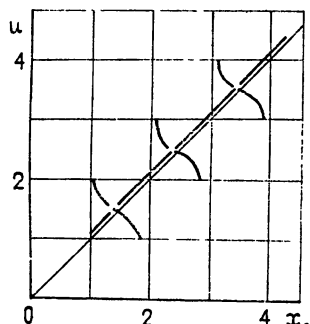


Рис. 2.



а)



б)

Рис. 3.

Рассмотрим синтез нуля ДН при помощи маски с фиксированными размером и амплитудой; управляемым параметром маски является координата ее центра. В случае ДН равномерного распределения поля (8), который исследовался экспериментально, оказалось, что при соответствующем выборе размера и амплитуды маски поставленная задача синтеза имеет точное решение для любого заданного направления x_0 . На рис. 3а приведены результаты расчета зависимости координаты центра маски u от координаты нуля x_0 для параметров маски $2\omega = 1$, $\beta = 1$ (прозрачная фазовая пластинка $\lambda/2$). Полученная зависимость неоднозначна, но искомое положение маски находится вблизи координаты нуля. Почти линейная зависимость u от x_0 получена для параметров $2\omega = 1$, $\beta = 0,85$ (рис. 3б). В последнем случае достигается наиболее простое управление фильтром, но существуют направления, для которых не удалось получить точный нуль ДН, однако уровень ДН в этих направлениях не превосходит -65 дБ, что в ряде случаев вполне приемлемо. Рассмотренный вариант перемещения координаты маски вблизи синтезируемого нуля ДН представляется более перспективным по сравнению с рассмотренными выше.

Оценка интеграла в правой части (6) показывает, что для приведенных параметров маски искажения параметров главного луча синтезируемой ДН $f_1(x)$ незначительны: расширение главного луча не превосходит 5% (по уровню 0,7), уменьшение уровня максимума главного луча не превосходит 6%.

Для исходной ДН равномерного распределения поля линейного источника (8) было проведено экспериментальное исследование возможности использования фильтров типа амплитудно-фазовой маски для синтеза нуля ДН. Схема экспериментальной установки с механическим перемещением маски приведена на рис. 4. Источником излучения служил лазер ЛГ-36А, работающий в одномодовом режиме с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм. Линзы L_1, L_2 формировали сходящуюся сферическую волну, которая освещала оптическую модель антенны $t_0(\eta)$. В качестве модели антенны использовалась щель шириной 0,25 мм. При таком размещении модели и линз L_1, L_2 достигается уменьшение размеров установки и имеется возможность управлять масштабом фурье-образа,

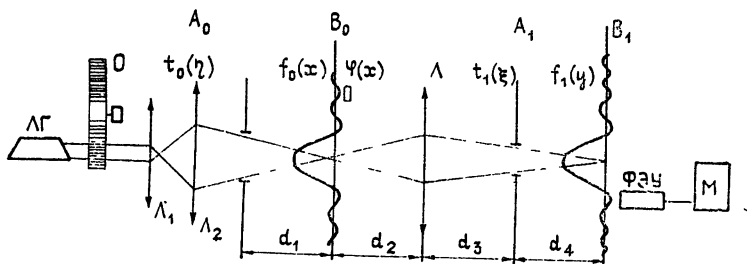


Рис. 4.

который определяется расстоянием d_1 [2]. Для $d_1 = 40$ см размер бокового лепестка ДН составил 1 мм. При фокусном расстоянии линзы L $f = 43$ см было принято $d_2 = 53,5$ см, $d_3 = 80$ см, $d_4 = 134$ см, что соответствовало размеру изображения щели в плоскости A_1 0,21 мм и размеру бокового лепестка сформированной ДН 4 мм. Формируемая ДН регистрировалась фотоумножителем ФЭУ-68 с диаметром входной апертуры 0,2 мм, что составляло 0,05 ширины бокового лепестка ДН. Измерения проводились на частоте 1 кГц, для чего луч лазера модулировался обтюратором O . Сигнал с ФЭУ измерялся микровольтметром M и контролировался с помощью осциллографа.

В плоскости B_0 исходной ДН помещался фильтр, который представлял собой стеклянную пластинку с прозрачной тонкой пленкой фтористого магния (MgF_2). Фтористый магний напылялся в виде клина шириной 1 мм ($2\omega = 1$). Фазовый сдвиг, вносимый маской, измерялся интерференционным методом с точностью 6%. Ориентация фильтра, при которой фаза падающей волны менялась на π ($\beta = 1$), определялась по минимуму сигнала ФЭУ при перемещении клина в направлении, перпендикулярном исходной ДН. Фильтр перемещался механически при помощи микрометрического винта.

Анализ прохождения сигнала через оптическую систему показывает, что минимальный уровень ДН, который может быть зарегистрирован в установке, определяется размерами входной апертуры ФЭУ, и в нашем случае этот уровень составлял — 38 дБ. При регистрации исходной ДН в плоскости B_0 оказалось, что реальная ДН совпадает с теоретической (8) в области первых боковых лепестков с ошибкой ~ -30 дБ.

Был проведен эксперимент, в котором направление x_0 изменялось в пределах $1,5 \leq x_0 \leq 3$ с шагом 0,25. Для каждого направления x_0 определялось положение маски, при котором достигается минимальный уровень ДН. Зафиксированный уровень ДН составил для различных x_0 от — 37 до — 40 дБ, что находится на пределе разрешения установки [6]. В качестве примера на рис. 5 приведены теоретический (а) и экспери-

ментальный (б) графики зависимости $|f_1(x_0)|$ от смещения маски относительно $x_0=1,5$. Отрицательное направление оси $u - x_0$ соответствует движению маски к главному максимуму. Незначительное расхождение теоретического и экспериментального графиков связано с искажениями, которые имеют место при вводе исходной ДН.

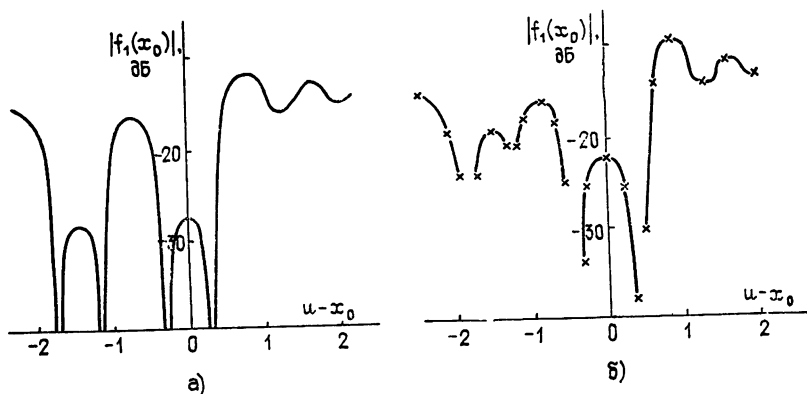


Рис. 5.

Таким образом, проведенный эксперимент показал, что для синтеза нуля ДН равномерного распределения поля может быть использована прозрачная фазовая полуволновая пластинка. При непрерывном перемещении пластины по исходной ДН существуют такие ее положения в окрестности выделенного направления, при которых уровень ДН не превосходит -37 дБ. Шумы, связанные с вводом исходной ДН, практически не влияют на достигнутый уровень сформированной ДН.

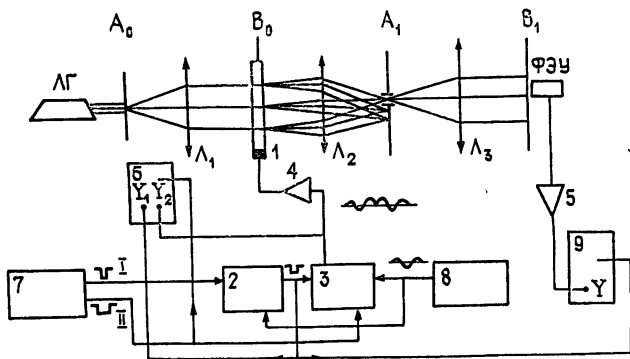


Рис. 6.

Возможность реализации процедуры синтеза ДН в реальном масштабе времени исследовалась на примере фильтра на основе акустооптической линии задержки [7]. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 6. Источником излучения служил лазер ЛГ-38, работающий в одномодовом режиме. Расходимость луча лазера составляла $< 2'$ при диаметре 33 мм. Моделью антенны являлась щель шириной ~ 55 мкм. При фокусном расстоянии объектива $L_1=300$ мм размер бокового лепестка исходной ДН составлял 4 мм.

Формирование амплитудно-фазовой маски осуществлялось при помощи акустооптического модулятора, в качестве которого использовался монокристалл молибдата свинца размером $34 \times 14 \times 6$ мм³, возбуждаемый преобразователем на основе ниобата лития. Несущая частота ультразвука составляла 19 МГц (при скорости звука 3,8 мм/мкс

этой частоте соответствует длина волны $\Lambda = 0,2$ мм). При возбуждении бегущей волны в канале линии задержки объектив L_2 формирует в плоскости A_1 изображения щели (модели антенны), соответствующие различным порядкам дифракции. Эти изображения не перекрываются, если

$$t_1 < (\lambda/\Lambda)f_2, \quad (9)$$

где t_1 — размер изображения щели, f_2 — фокусное расстояние объектива L_2 . Для принятых параметров $t_1 = 60$ мкм, $\lambda = 0,63$ мкм, $\Lambda = 0,2$ мм, $f_2 = 300$ мм условие (9) выполнялось с достаточным запасом. Размер бокового лепестка сформированной ДН составлял 3 мм, диаметр входной апертуры ФЭУ — 0,2 мм. Сигнал ФЭУ после усиления подавался на вход У осциллографа 9 (рис. 6).

Параметры фильтра определялись видом радиоимпульса, поступающего на преобразователь линии задержки. Управление амплитудой и фазой сигнала, поступающего с генератора 8, осуществлялось импульсным генератором 7 (рис. 6) посредством специального блока формирования. Генератор 7 (рис. 6) обеспечивал формирование двух прямоугольных импульсов с независимо регулируемой длительностью и задержкой первого импульса по отношению ко второму. Первый импульс поступает на вход блока синхронизации 2 (рис. 6), обеспечивающего кратность размера маски длине волны ультразвука и привязку фронтов маски к задней фазе ультразвуковой волны. Вторым импульсом и сигналом с выхода блока синхронизации управляли работой блока формирования радиоимпульсов 3 (рис. 6). На выходе этого блока формировалось синусоидальное колебание с частотой 19 МГц, которое в области локализации маски изменяло фазу на π . Блок формирования обеспечивал возможность регулировать относительную амплитуду сигнала в области маски в диапазоне $0 \div 2,5$. Сформированный радиоимпульс после усиления 4 (рис. 6) через высокочастотный согласующий трансформатор подавался на акустический преобразователь линии задержки. Приведенная схема позволяет регулировать положение маски на исходной ДН, ее размер и амплитуду.

Скважность поступающих в линию задержки радиоимпульсов (~ 100) была достаточно большой для того, чтобы исключить образование стоячих волн заметной интенсивности. Это дало возможность значительно снизить среднюю мощность, подводимую к преобразователю линии задержки, и не применять специальных мер для обеспечения температурной однородности звукопровода и устранения отраженной волны.

Для синхронизации развертки контрольного осциллографа 6 (рис. 6) использовался передний фронт П импульса генератора 7 (рис. 6), а для запуска осциллографа 9 (рис. 6) — передний фронт импульса, формируемого блоком синхронизации 3 (рис. 6).

Минимальный уровень ДН, который мог быть определен в данной установке, определялся оптическими шумами и составлял ~ -25 дБ.

Эксперимент показал, что для достижения минимального уровня $|f_1(x_0)|$ маска должна менять фазу падающей волны на π , а коэффициент пропускания маски по амплитуде γ должен быть не ниже 75%. Для $\gamma = 0,75$ размер маски равнялся размеру бокового лепестка ДН, а ее центр совпадал с координатой нуля $u = x_0$. Для $\gamma < 0,75$ и $u = x_0$ оптимальный размер маски монотонно уменьшался. В качестве примера на рис. 7 приведена осциллограмма сигнала ФЭУ при подавлении максимума первого бокового лепестка для параметров маски $2\omega = 0,8$,

$\beta=0,875$. Движению маски влево соответствует ее смещение к главному максимуму исходной ДН. Правый минимум интенсивности возникает при локализации маски в окрестности синтезируемого нуля ДН, левый минимум связан с искажением маской главного луча ДН.

Малые смещения центра маски с $\gamma=75\%$ относительно направления x_0 приводили к синтезу ДН с уровнем подавления $-25 \div -28$ дБ,

который определялся аппаратурной ошибкой. Время формирования ДН в такого типа устройствах определяется временем задержки акустооптической линии и в нашем случае составляло ~ 9 мкс.

Таким образом, теоретические оценки и результаты экспериментов указывают на принципиальную возможность решения задачи синтеза ДН с нулем в

заданном направлении средствами когерентной оптики. В качестве оптического фильтра может быть использована маска с регулируемым размером, коэффициентом пропускания или координатой геометрического центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахрах Л. Д., Колосов Ю. А., Курочкин А. П., Троицкий В. И. — В сб.: Антенны. — М.: Связь, 1969, вып. 5, с. 47.
2. Гудмен Дж. У. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
3. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. — М.: Сов. радио, 1969.
4. Судаков О. А.—Труды РТИ АН СССР, 1977, № 27, с. 143.
5. Судаков О. А., Кульбеда В. Е., Коробейников Ю. А. — Труды МФТИ. Сер. Общ. и молек. физика, 1975, № 7, с. 103.
6. Кульбеда В. Е., Судаков О. А., Ягодин В. О.— Труды МФТИ. Сер. Общ. и молек. физика, 1977, № 9, с. 186.
7. Бочкарь Е. П., Кульбеда В. Е., Судаков О. А., Дахикян Р. Г. — Труды РТИ АН СССР, 1977, № 27, с. 125.

Московский физико-технический институт

Поступила в редакцию
11 марта 1981 г.

SYNTHESIS OF THE ANTENNA DIRECTIVITY PATTERN WITH A ZERO IN THE GIVEN DIRECTION BY MEANS OF THE COHERENT OPTICS

E. P. Bochkar', V. E. Kul'bada, O. A. Sudakov, V. O. Yagodin

By the method of antenna optical modelling a problem is considered for the synthesis of the antenna directivity pattern with a zero in the given direction. The paper presents theoretical results, the description of experimental installations and experimental results obtained when using optical filters in the form of a phase mask formed on the basis of the acoustic delay line or by spraying of a thin dielectric film on a transparent sublayer.