

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.17>

УДК: 621.396: 534.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ ПРИЕМНЫХ ТРАКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. А. Аршакян¹, Е. А. Макарецкий², А. В. Овчинников²

¹ Фирма «Алькор», 301214, Тульская обл., Щекинский р-н,
д. Ясная Поляна, ул. Школьная, 19

² Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92

Статья поступила в редакцию 20 июля 2021 г.

Аннотация. Предложена методика электродинамического моделирования электродных систем deflectоров оптоэлектронных спектроанализаторов приемных трактов радиолокационных систем, позволяющая произвести анализ характеристик согласования и настройку на уровне модели электродной структуры, что способствует снижению трудоемкости их изготовления и настройки.

Ключевые слова: акустооптический deflectор, встречно-штыревой преобразователь, компьютерное моделирование, электродинамическая модель.

Abstract. A technique is proposed for electrodynamic modeling of electrode systems of deflectors of optoelectronic spectrum analyzers of receiving paths of radar systems, which makes it possible to analyze the matching characteristics and adjust at the level of the electrode structure model, which helps to reduce the labor intensity of their manufacture and adjustment.

Key words: acousto-optic deflector, interdigital transducer, computer simulation, electrodynamic model.

Введение.

Разработка сканирующих приемных трактов радиолокационных систем связана с проблемой высокоскоростного анализа входного сигнала и поиска

диапазона, в котором присутствует полезный сигнал. Одним из возможных решений данной проблемы является использование акустооптических устройств (АОУ), позволяющих создавать беспойсковые по частоте и направлению входные приемные тракты с высокими характеристиками по разрешающей способности, точности [1] и при этом имеющие невысокие массо-габаритные параметры.

1. Реализация акустооптических спектроанализаторов.

Рассмотрим принцип работы классической схемы акустооптического анализатора спектра на дефлекторе Брегга (рис. 1а), который является прообразом многих функционально аналогичных современных устройств.

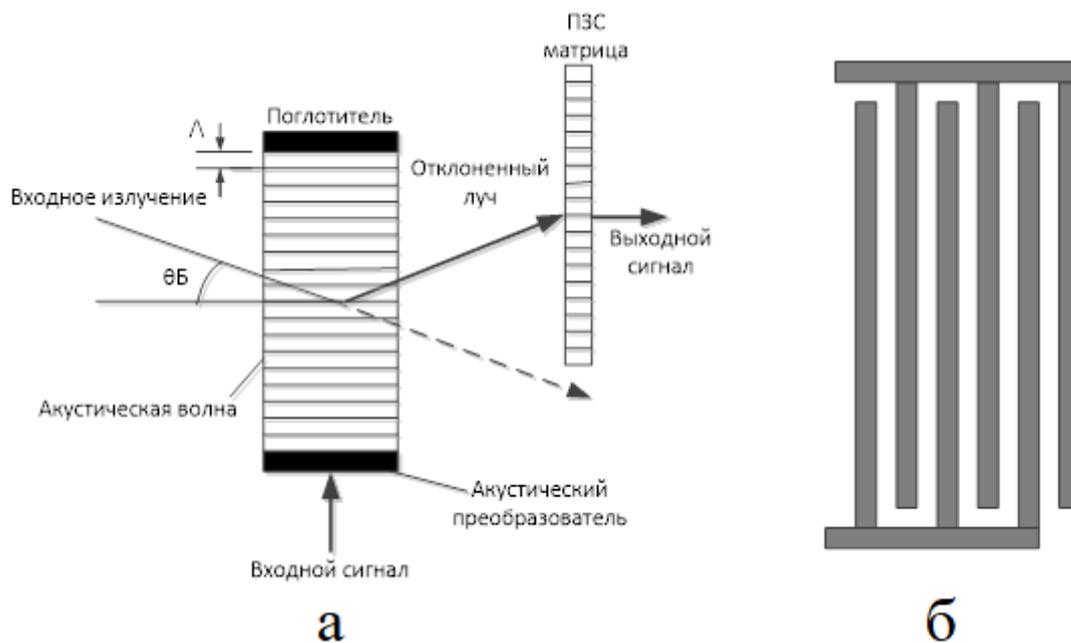


Рис. 1. Акустооптический спектроанализатор на дефлекторе Брэгга (а) и конструкция встречно-штыревого акустического преобразователя (б).

Входной радиосигнал сигнал после переноса на промежуточную частоту поступает через встречно-штыревой акустический преобразователь (ВШП), схема которого представлена на рис. 1б, на вход акустооптического дефлектора (АОД), реализованного на оптически прозрачном кристалле ниобата лития (LiNbO_3) или диоксида теллура (TeO_2). В результате на поверхности кристалла возбуждается упругая бегущая акустическая волна и, как следствие, формируется переменное распределение оптического коэффициента

преломления вдоль направления ее распространения. АОД в свою очередь освещается когерентным лазерным лучом, падающим на кристалл под углом Брэгга θ_B по отношению к направлению распространения акустической волны.

Дифракция оптического излучения на неоднородной среде кристалла приводит к отклонению лазерного излучения от своего исходного направления. Отклоненный луч фокусируется на линейке фотодетекторов, которая чаще всего реализуется на приборах с зарядовой связью (ПЗС). При этом отклонение лазерного излучения пропорционально частоте входного радиосигнала, а координата оптического излучения на ПЗС-матрице однозначно определяет частоту входного сигнала.

2. Особенности реализации акустооптических дефлекторов для радиоприемных трактов.

Кажущаяся простота реализации акустооптического дефлектора достаточно обманчива, т. к. в нем объединены акустические, оптические и электрические части функциональных узлов. И только оптимальное сочетание параметров этих функциональных узлов позволяет получить требуемые характеристики дефлектора – разрешение, оптическое пропускание, полосу рабочих частот и т. д. При этом одна из ключевых характеристик – полоса рабочих частот, в основном определяется согласованием источника сигнала и электродной структуры преобразователя.

К особенностям высокочастотных АОД, применяемых в радиоприемных трактах, относится расположение элементов схемы согласования источника входного сигнала со встречно-штыревым преобразователем непосредственно на кристалле. Такая конструктивная особенность предполагает необходимость использования элементов подстройки, поскольку из-за технологического разброса параметров встречно-штыревого преобразователя и неточностей расчета и формирования элементов схем согласования требуется изменение их номиналов [2]. Последний фактор значительно повышает трудоемкость

производства АОД и увеличивает процент брака при производстве, т. к. настройка связана с риском повреждения кристалла.

Устранение данного негативного фактора может быть обеспечено повышением точности проектирования ВШП с элементами согласования на кристалле до уровня, который обеспечит получение окончательного варианта топологии устройства.

При разработке акустооптических deflectоров наибольшее распространение получил схемотехнический метод [2, 3], в основе которого лежит расчет параметров ВШП по схеме замещения с последующим проектированием схемы согласования.

Поскольку известные соотношения для расчета параметров ВШП и топологии согласующих элементов являются приближенными, конечный результат имеет невысокую точность и требует настройки, которая выполняется установкой перемычек на элементах сформированной пленочной структуры.

Для устранения перечисленных недостатков авторы предлагают использовать методы, широко используемые при проектировании СВЧ устройств – проведение электродинамического моделирования топологической структуры и ее настройка на уровне модели, что позволит сократить до минимума настроечные операции и снизить процент брака.

3. Электродинамическое моделирование АОД.

При электродинамическом моделировании основные параметры ВШП и схемы согласования описываются параметрами используемых материалов и геометрией топологической структуры. Кроме того, электродинамическая модель позволяет оценить влияние технологических факторов (погрешностей формирования топологии) и разброса параметров используемых материалов на рабочие характеристики АОД. Среди недостатков электродинамического моделирования можно выделить высокие стоимость программного обеспечения и требования к производительности используемых вычислительных средств.

Для оценки эффективности использования методов электродинамического моделирования для повышения точности проектирования ВШП, авторы выполнили моделирование реальных топологий АОД спектроанализаторов радиосигналов с рабочим диапазоном 0,6 – 1,2 ГГц в ПО для электродинамического моделирования AWR Microwave Office.

В ходе данной работы были выполнены нижеперечисленные этапы:

- 1) Разработана модель кристалла ниобата лития (LiNbO_3). Поперечные размеры модели равны поперечным размерам реального кристалла. Значение диэлектрической проницаемости кристалла, использованное при моделировании, $\varepsilon = 44$;
- 2) На поверхности модели кристалла сформирована топология ВШП и схемы согласования в соответствии с чертежом реального устройства. Сетка расчета при электродинамическом моделировании принималась кратной минимальному размеру элементов – ширине стержней ВШП. Все размеры модели соответствуют чертежу реального устройства, округление не использовалось. В качестве материала проводящего слоя, толщиной 2 мкм, в модели использовались идеальный проводник, алюминий, медь, но как показали дальнейшие исследования, изменение материала не сказывается на результатах моделирования;
- 3) Частичное преобразование энергии в акустическую волну моделировалось введением активных потерь в материал подложки заданием значения угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\delta)$;
- 5) Т. к. в электродинамической модели (ЕМ-проекте) невозможно использовать дискретные элементы, параллельная емкость в схеме согласования заменена плоским конденсатором с воздушным диэлектриком толщиной 5 мкм, расположенным на заземленном электроде топологии. Размеры конденсатора обеспечивают заданную емкость, верификация обеспечивалась контролем реактивного сопротивления на центральной частоте диапазона;
- 6) Оценка характеристик моделируемой топологии проводилась по модулю коэффициента отражения от входа (элемент S_{11} матрицы рассеяния), входному

сопротивлению (действительная $\text{Re}Z_{11}$ и мнимая $\text{Im}Z_{11}$ части) схемы и коэффициенту стоячей волны по напряжению (КСВН);

7) Все переключки при анализе и настройке выполнялись из идеального проводника.

Разработанная и в дальнейшем исследованная топология ВШП АОД с элементами подстройки показана на рис. 2.

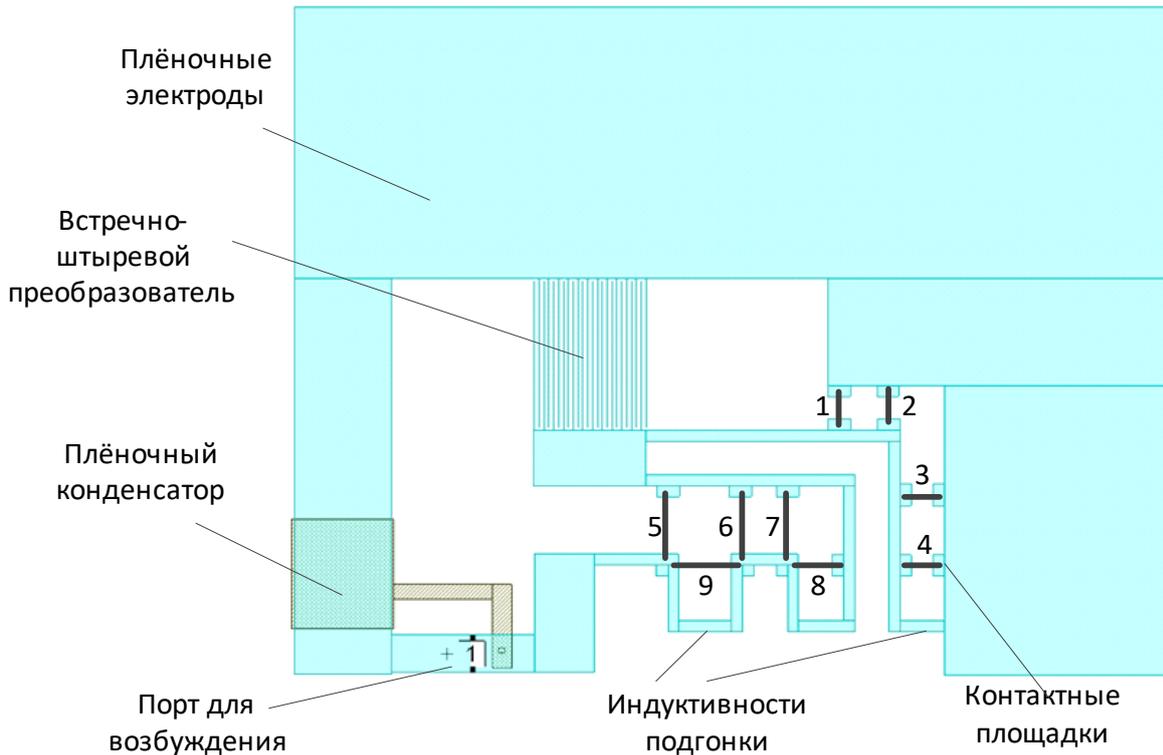


Рис. 2. Топология электродинамической модели электродной структуры ВШП в ПО Microwave Office (номераи помечены переключки для подгонки).

Для подтверждения адекватности предложенной методики результаты электродинамического моделирования сравнивались с экспериментально измеренными характеристиками спектроанализаторов.

Экспериментально исследованный спектроанализатор предназначен для работы в диапазоне частот 600 – 800 МГц. На входе схемы согласования исследуемого устройства включен дискретный конденсатор 5,6 пФ (в модели этот конденсатор реализован в виде пленочной слоистой структуры).

Для удобства сравнения расчетных и экспериментальных результатов в качестве частотной характеристики электродной структуры использовался

коэффициент стоячей волны по напряжению. Результаты расчетных и экспериментально полученных характеристик для различных вариантов установки перемычек приведены на рис. 3-5.

Из рис. 3-5 видно, что характеристики имеют качественную сходимость и совпадение положения минимума КСВН по частоте (центральная частота полосы согласования).

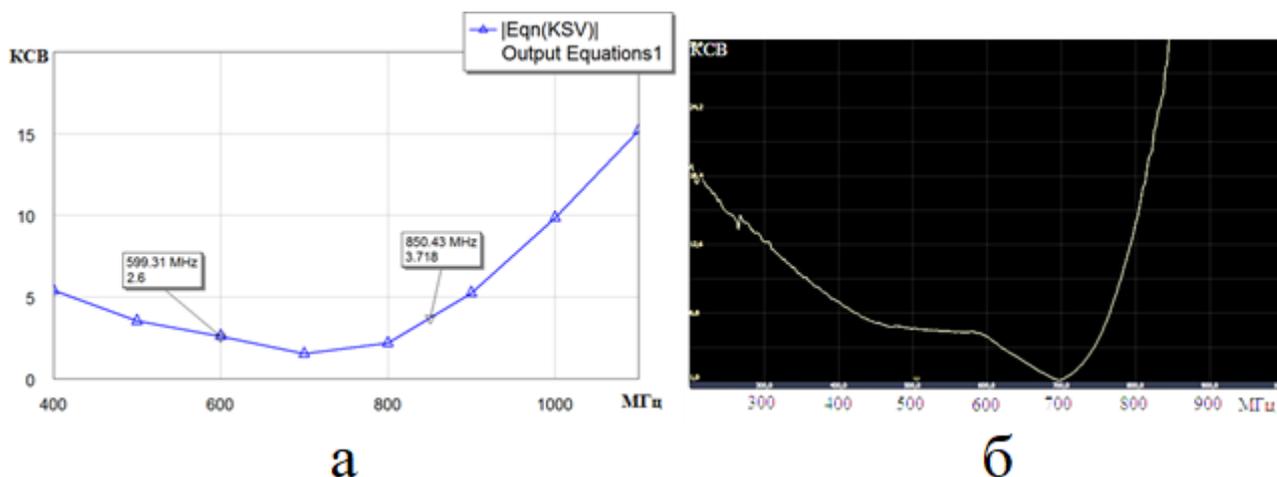


Рис. 3. Частотная характеристика электродной структуры по результатам электродинамического моделирования (а) и экспериментальная частотная характеристика электродной структуры без перемычек (б).

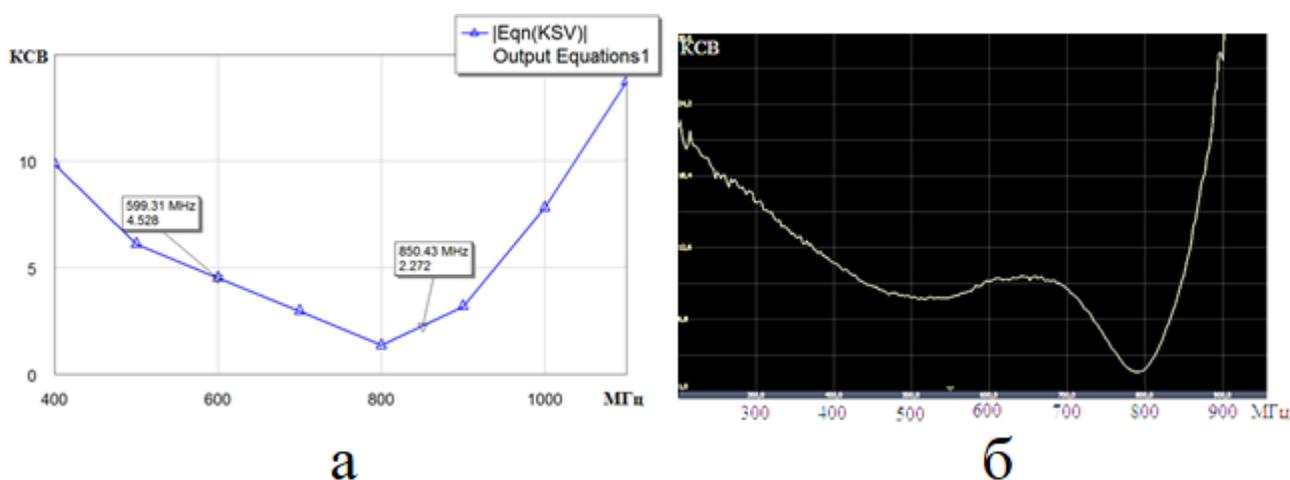


Рис. 4. Частотная характеристика электродной структуры (а) по результатам электродинамического моделирования (перемычка 2) и экспериментальная частотная характеристика соответствующей электродной структуры (б).

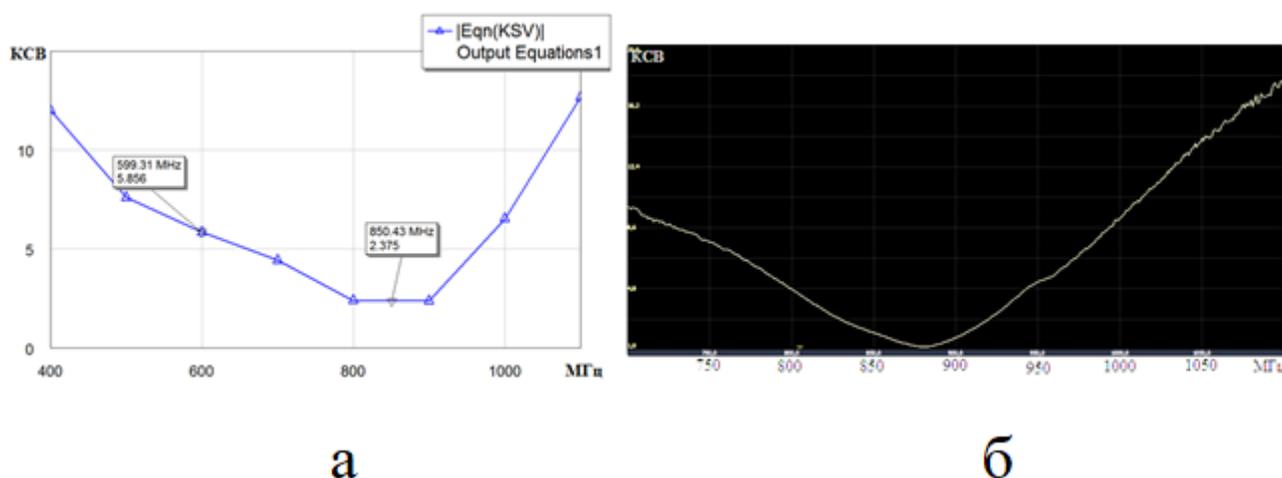


Рис. 5. Частотная характеристика электродной структуры (а) по результатам электродинамического моделирования (перемычки 1, 2, 3) и экспериментальная частотная характеристика соответствующей электродной структуры (б).

Количественные результаты (значения КСВН на конкретных частотах) отличаются, что объясняется отсутствием конкретных данных об эффективности преобразования электрического сигнала в акустическую волну, поскольку моделирование проводилось только для электрических процессов и потери на акустическое преобразование учитывались лишь введением диэлектрических потерь в материал подложки. Оценить потери преобразования для конкретной электродной структуры принципиально возможно, но для каждой топологии они будут различны и требуют значительных вычислений.

Заключение.

Предложенный метод подгонки частотной характеристики КСВН с помощью моделирования может использоваться на практике для снижения трудоёмкости настройки дефлекторов. В этом случае проведение предварительного моделирования позволит не только оценить исходную согласованность конструкции и уточнить значение ёмкости согласующего конденсатора, но и дать рекомендации по необходимости проведения подгонки электродной структуры с указанием конкретных номеров перемычек.

Литература

1. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение*. Москва, Радио и связь. 1978. 112 с.
2. Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А. *Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств*. Москва, Радио и связь. 1981. 184 с.
3. Войцеховский А.В., Скрыльников А.А. *Расчёт и оптимизация параметров устройств на поверхностных акустических волнах*. Томск, Изд-во ТГУ. 2010. 56 с.

Для цитирования:

Аршакян А.А., Макарецкий Е.А., Овчинников А.В. Моделирование акустооптических дефлекторов для сканирующих приемных трактов радиолокационных систем. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.17>