

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ В КАЧЕСТВЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ

Гильмутдинов Р.В. *¹, Меньших Н.Л.¹, Солосин В.С.¹, Фёдоров С.А.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 15.09.2023
Одобрена после рецензирования 26.09.2023
Принята к публикации 02.10.2023

Аннотация

В данной работе представлены варианты модернизации широкополосной антенны Satimo SH2000 путем изменения формы конькового перехода, применения боковых стенок и установки фазового корректора в виде рассеивающей линзы. Была создана компьютерная модель исходной антенны. Экспериментально подтверждено, что разработанная электродинамическая модель антенны позволяет получить характеристики излучения с достаточной точностью. Методом интегральных уравнений в программном пакете FEKO было исследовано влияние типов модификаций антенны на форму диаграммы направленности. Проведено сравнение полученных в результате модификации антенны диаграмм направленности с соответствующими диаграммами исходной антенны в полосе частот. Рассмотрено три модификации антенны. Использование фазового корректора расширяет диаграмму направленности в Е-плоскости. Установлено, что применение небольших дополнительных стенок в модификации Н-стенки позволяет в Н-плоскости сузить диаграмму направленности. Расширяющийся коньковый переход способствует также расширению диаграммы направленности в Е-плоскости и позволяет уменьшить асимметрию формы диаграммы направленности в главных плоскостях. Показано, что модернизация антенны позволяет создать более стабильную по форме и размерам диаграмму направленности в полосе частот с коэффициентом перекрытия больше двух. Полученная форма диаграммы направленности позволяет рассмотреть модернизированную антенну в качестве облучателя коллиматора.

Ключевые слова: антенна Вивальди, FEKO, облучатель, фазовый корректор, диаграмма направленности

EDN BBLGEU

doi:[10.24412/2949-0553-2023-46-30-37](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2023-46-30-37)

Введение

Важнейшей характеристикой радиофизического измерительного стенда является неравномерность распределения амплитуды и фазы поля в рабочей зоне. Компактные полигоны обеспечивают более высокую точность измерения [1] характеристик рассеяния объектов и параметров излучения антенн в заданной полосе частот по сравнению с другими измерительными стендами. Использование коллимирующего устройства в виде зеркала или линзы позволяет получить во всем рабочем диапазоне частот постоянную по своим размерам область пространства, в которой распространяется квазиплоская волна. Одним из факторов, влияющих на неравномерность распределения поля в рабочей зоне, является диаграмма направленности (ДН) облучателя [2].

Основные требования [2] к облучателям следующие: ширина ДН должна слабо зависеть от частоты, ДН должна иметь почти постоянный уровень в определенном секторе углов и быстро спадать к краям коллиматора.

Наиболее распространенными облучателями коллиматора являются рупорные антенны [1, 3]. Данный вид облучателей имеет ряд недостатков, в частности, для них характерно сужение ДН с

* Автор, ответственный за переписку: Гильмутдинов Руслан Валерьевич, psevduch777@gmail.com

ростом частоты. В литературе [1, 4] описаны различные способы устранения этих недостатков. Почти постоянная ширина ДН облучателя в полосе частот может быть достигнута за счет использования фланца [5] или гофрированного рупора [6]. Для обеспечения более резкого спада амплитуды поля на краях зеркала коллиматора предложено использовать специальные поглощающие насадки для рупора [7]. Это способствует заметному уменьшению уровней бокового излучения. В качестве облучателя также рассматривался рупор с изломом образующей [8, 9]. Данный рупор имеет область с почти одинаковой амплитудой поля в полосе частот 20 % от центральной частоты.

В последнее время особое внимание уделяется применению аддитивных технологий при модернизации характеристик облучателей. С помощью технологии 3D-печати была изготовлена линза с градиентным показателем преломления [10]. Использование такой линзы позволило существенно увеличить излучаемую мощность антенны в главном лепестке. В дальнейшем [11] была исследована возможность интегрирования градиентной диэлектрической вставки непосредственно в облучатель, представляющий собой прямоугольный волновод. Показано, что применение диэлектрической вставки позволяет снизить уровень боковых лепестков.

При измерении различных характеристик рассеяния объектов, таких как эффективная площадь рассеяния (ЭПР), в зависимости от типа стенда важно иметь облучатель с заданной ДН. Например, в конической камере [12] источник излучения устанавливается в вершину расширяющейся части безэховой камеры (БЭК), потому большое значение имеет только ДН в главном лепестке. Особое внимание в последнее время уделяется проблематике использования рупорных антенн, применяемых при проведении измерений в компактных полигонах [9, 13], или при исследовании свойств материалов, таких как коэффициент отражения, на бистатическом стенде [14].

Целью настоящей работы является исследование способов модификации широкополосной антенны для получения более стабильной ширины ДН по частоте в главных плоскостях облучателя.

Постановка задачи

В качестве исходной модели облучателя рассматривается антенна с коньковым переходом типа Satimo SH2000. Данная антенна в широкой полосе частот (8-18 ГГц) имеет почти постоянный коэффициент усиления и, следовательно, устойчивую от частоты диаграмму направленности, что позволяет рассмотреть ее в качестве облучателя коллиматорного комплекса. Однако в Е-плоскости диаграмма не полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к облучателям коллиматора, и нуждается в модификации.

Для расчета ДН антенны и ее модификаций была создана модель антенны с использованием пакета для электродинамического моделирования FEKO. Расчет ДН проводился методом моментов. Использовалась неравномерная сетка с характерным шагом $\lambda/12$.

Для проверки корректности электродинамической модели антенны были проведены численные расчеты и экспериментальные измерения ДН. На рис. 1 представлены рассчитанные и измеренные сечения ДН в главных плоскостях на частоте 16 ГГц. Результаты численного расчета и эксперимента находятся в соответствии друг с другом, кривые не имеют серьезных различий. (Результаты численного расчета и эксперимента отличаются на 0,2 дБ, и это указывает на точность расчетов для выбранной электродинамической модели антенны)

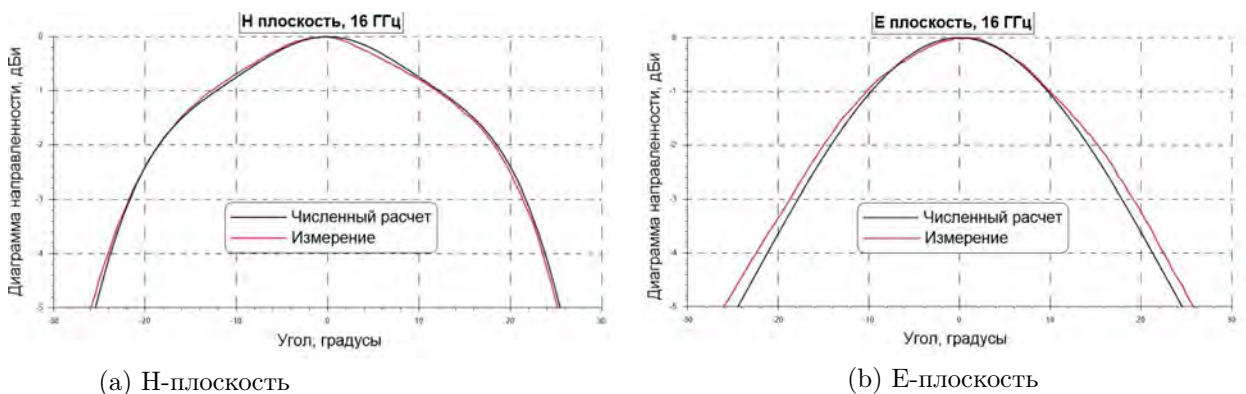


Рисунок 1 – ДН антенны в исходном виде, частота 16 ГГц

На рис. 2 изображены сечения ДН антенны Satimo SH2000 в главных плоскостях для пяти частот. Можно отметить наличие так называемой «полочки» в диапазоне 8 – 12,5 ГГц – сектор углов с

примерно постоянным значением ДН, а также слабое спадание ДН к 30 градусам в Н-плоскости. В Е-плоскости ДН в диапазоне частот 15-18 ГГц имеет резкие спады в секторе углов до 15 градусов. С ростом частоты наблюдается сужение ДН. Можно отметить существенные различия в сечениях ДН в главных плоскостях.

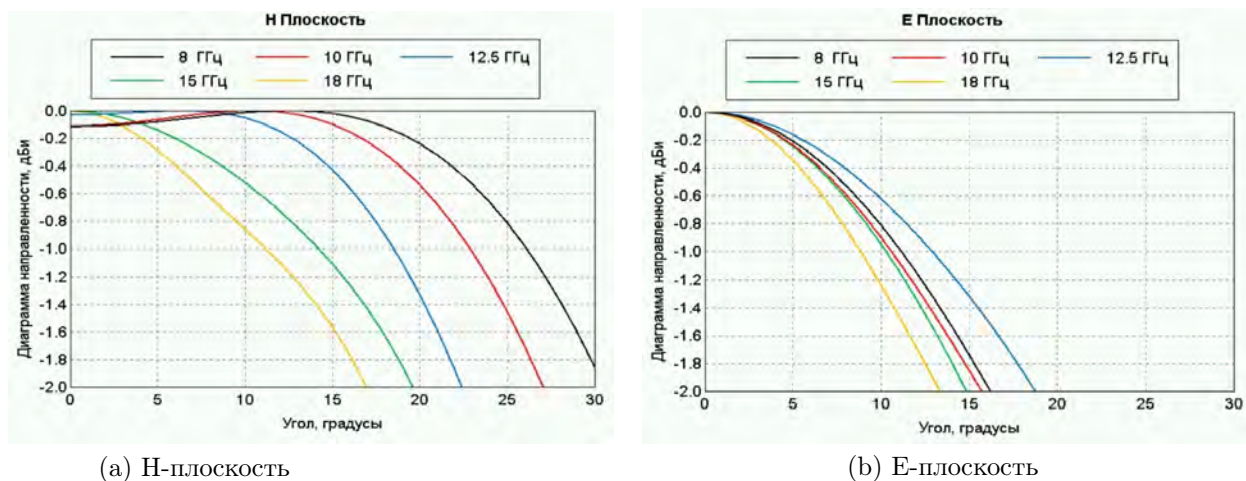


Рисунок 2 – Расчетные ДН антенны в исходном виде

Наличие «полочки» в ДН в полосе частот является преимуществом для облучателя. Однако для облучателя, как правило, требуется примерно одинаковая форма ДН в главных плоскостях. Существенная разница в форме ДН для Е- и Н- плоскостей является серьезным недостатком облучателя и фактором, из-за которого его применение малоэффективно.

Добавляя металлические или диэлектрические элементы в конструкцию антенны, можно существенно менять ее ДН. В данной работе представлены разработанные виды модификаций исследуемой широкополосной антенны, позволяющие изменить ДН в заданной полосе частот.

Значения ДН различных модификаций сравнивались между собой и с результатами расчетов ДН антенны в исходном виде.

Исследование модификаций

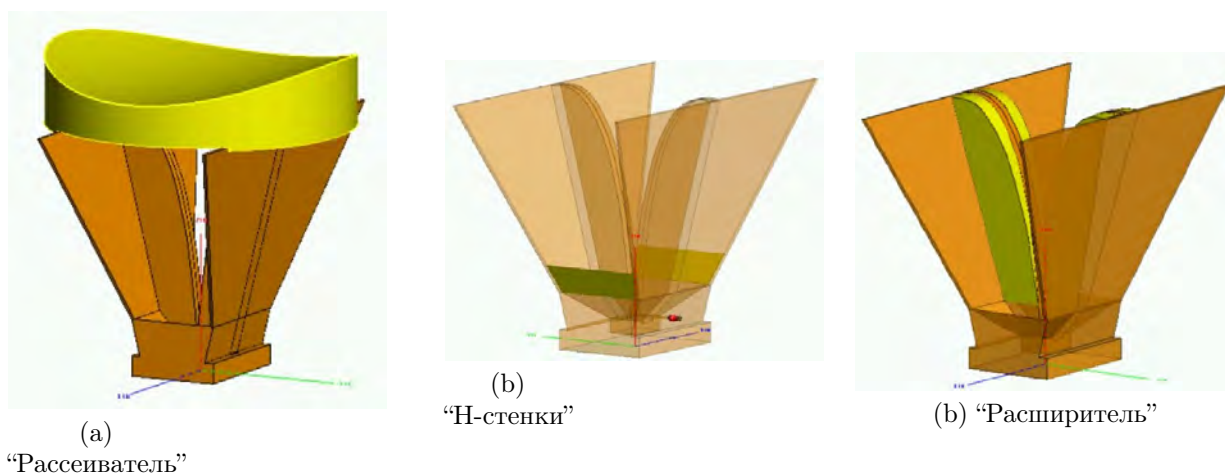


Рисунок 3 – Виды модификаций антенны

Для устранения недостатков, указанных выше, предлагается использовать следующие модификации. На рис. 3 изображены виды модификаций антенны. На рис. За показана модификация “Рассеиватель”, представляющая собой рассеивающую эллиптическую линзу с радиусами кривизны в Е-плоскости 100 мм, Н-плоскости 250 мм, выполненную из пенопласта с диэлектрической проницаемостью 1,1. Эллиптические линзы [15] активно применяются при модернизации антенно-фидерных устройств. В нашем случае линза вогнутая, с разными радиусами кривизны. Данная модификация призвана расширить ДН антенны в Е-плоскости за счет существенного замедления волны, распространяющейся вдоль Е-стенок антенны. При этом ожидается, что линза начнет оказывать заметное влияние

на ДН в высокочастотной части рабочего диапазона, в которой у прототипа происходит заметное сужение диаграммы.

Модификация “Н-стенки” (рис. 3b) способствует нивелированию полочки в области низких частот. Боковые металлические вставки [16] увеличивают размер апертуры, тем самым сужая ДН в Н-плоскости. В нашем случае высота стенок равна 15 % от высоты антенны. Известно, что обычный рупор имеет равную ширину диаграммы в главных плоскостях при соответствующих соотношениях сторон.

Модификация “Расширитель” позволит устранить негативные последствия модификаций “Рассеиватель” и “Н-стенки”, а также уменьшить асимметрию ДН в главных плоскостях. В данной модификации толщина конькового перехода линейно растет от резонатора до апертуры антенны. Утолщение конькового перехода происходит за счет добавления металлических клиновидных вставок (рис. 3с) с углом расширения клина равным 5 градусам.

На рис. 4 изображена ДН антенны Satimo SH2000 и её модификации “Рассеиватель” в главных плоскостях. В Н-плоскости в области низких частот наблюдается переход ДН из “полочки” в воронкообразную форму. Можно отметить уширение ДН в обеих плоскостях и сохранение асимметрии ДН.

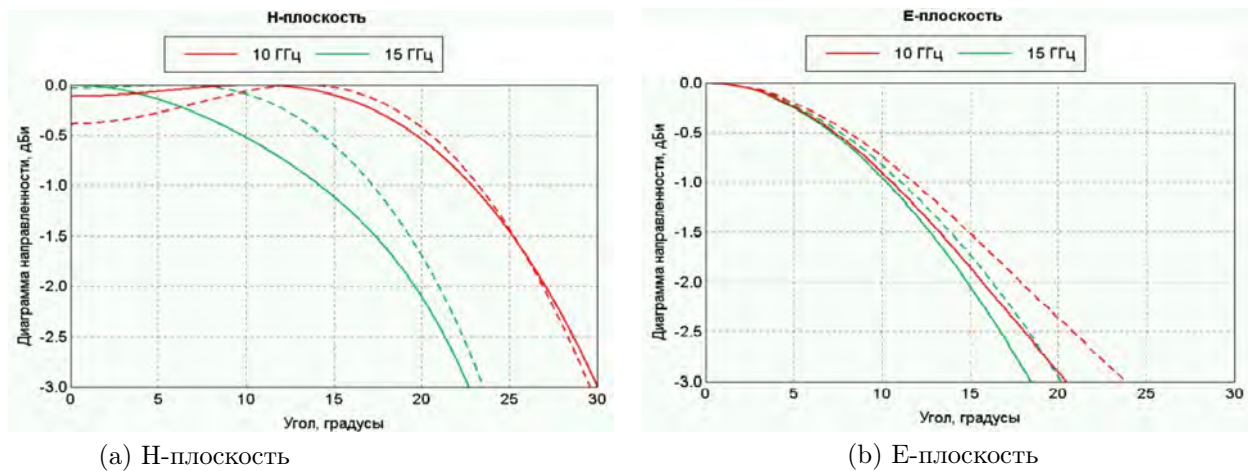


Рисунок 4 – Сечения ДН Satimo SH2000 (Сплошная) и модификации “Рассеиватель” (пунктирная)

На рис. 5 изображена ДН антенны Satimo SH2000 и её модификации “Н-стенки” в главных плоскостях. В Н-плоскости наблюдается резкое сужение ДН куполообразной формы в диапазоне 8-12,5 ГГц. В области высоких частот незначительное уширение ДН. В Е-плоскости ДН незначительно сузилась, наблюдается небольшое уменьшение асимметрии.

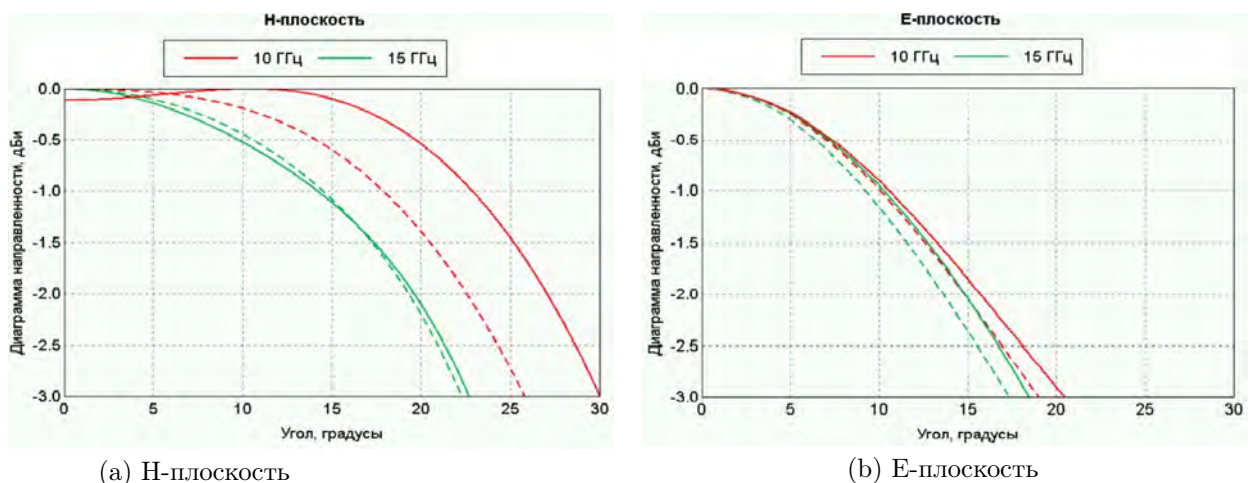


Рисунок 5 – Сечения ДН Satimo SH2000 (Сплошная) и модификации “Н-стенка” (пунктирная)

На рис. 6 изображена ДН антенны Satimo SH2000 и её модификации “Расширитель” в главных плоскостях. В Н-плоскости наблюдается незначительное сужение ДН и повышение уровня значений полочки в диапазоне 8-12,5 ГГц, вследствие чего уменьшается асимметричность ДН. В Е-плоскости ДН стала шире во всем исследуемом диапазоне.

Пока изменения в ДН можно считать малыми, допустимо предполагать, что объединение моди-

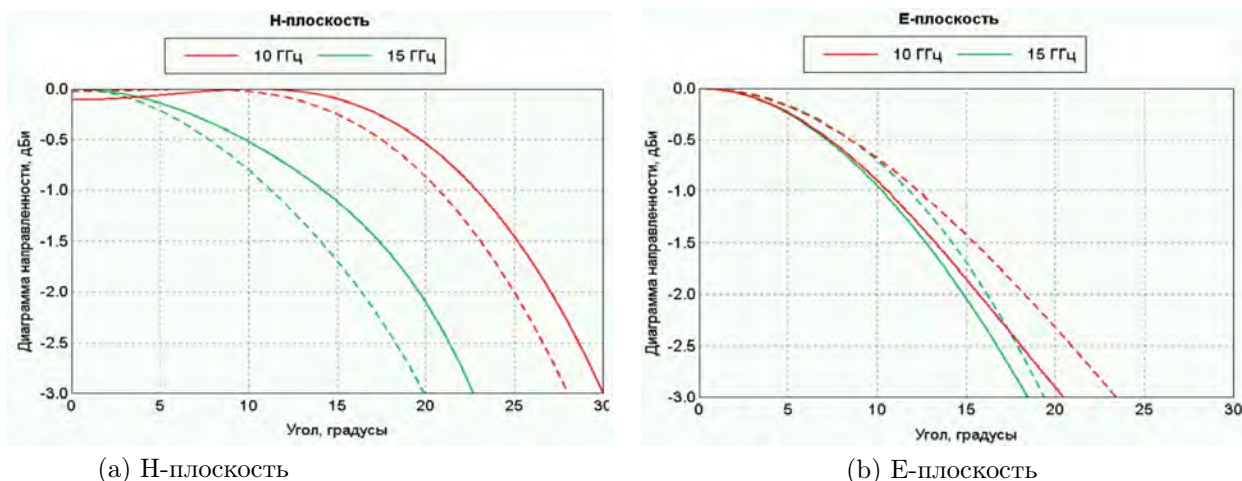


Рисунок 6 – Сечения ДН Satimo SH2000 (Сплошная) и модификации “Расширитель” (пунктирная)

модификаций позволит дополнить преимущества описанных выше модификаций. Рассмотрим объединение данных модификаций с целью синтеза их преимуществ. На рис. 7 представлена модификация “Объединение”, представляющая собой интеграцию модификаций, рассмотренных выше.

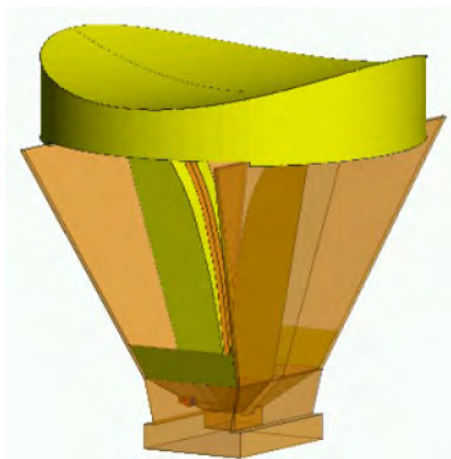


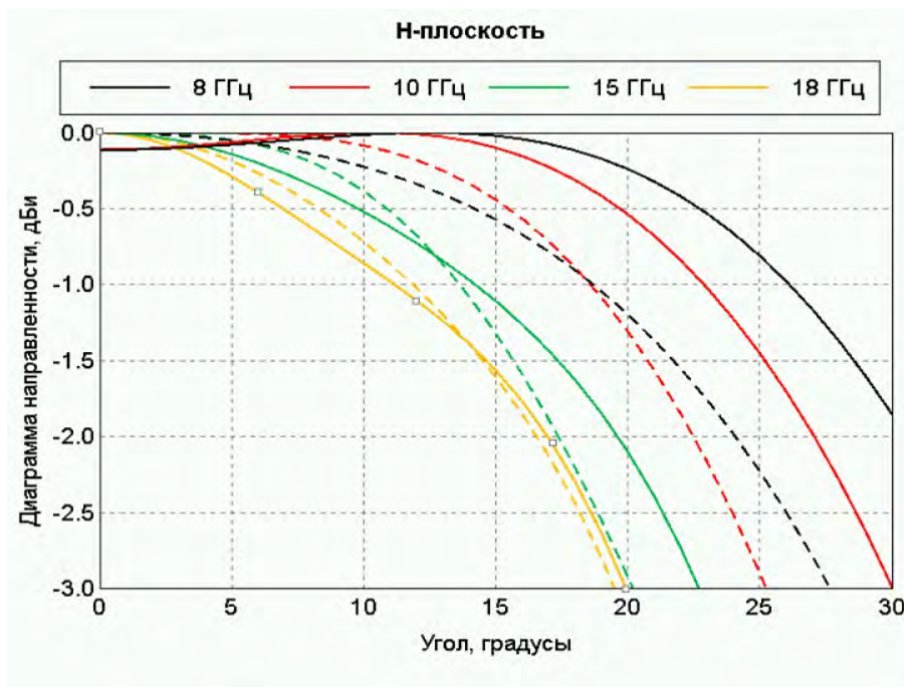
Рисунок 7 – Модификация “Объединение”

На рис. 8 показаны ДН антенны Satimo SH2000, и её модификации “Объединение” в главных плоскостях. В Н-плоскости уровень полочки стал выше. Форма ДН во всем исследуемом диапазоне частот стала куполообразной. В области углов до 15 градусов ДН стала шире, а вне этой области наблюдается резкое падение. В Е-плоскости ДН стала шире во всем частотном диапазоне. Наблюдается незначительная асимметрия.

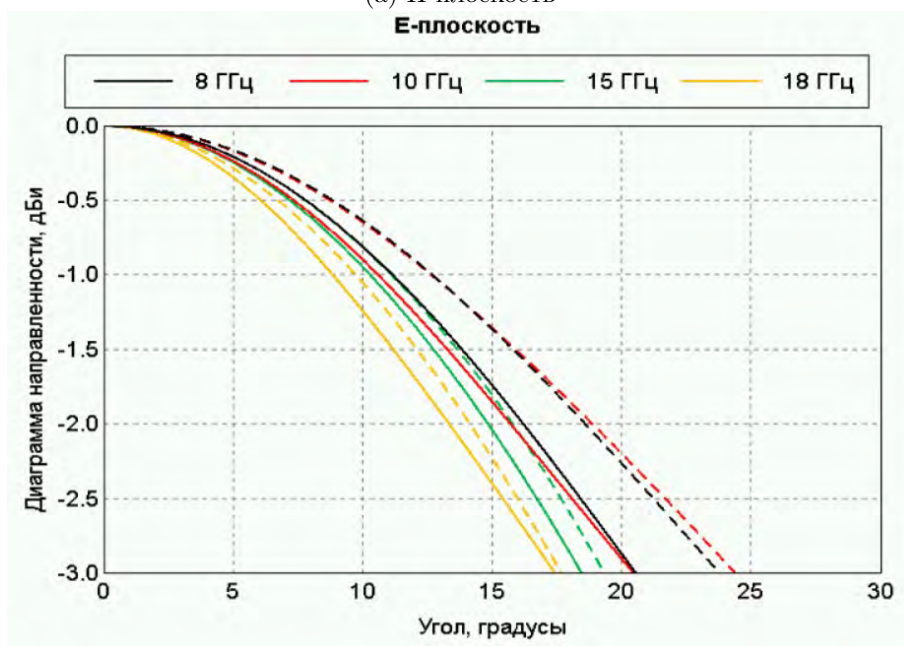
Заключение

Проведено исследование модификации широкополосной антенны для формирования у нее специальной формы ДН. Рассмотрены три модификации антенны, которые позволяют получить определенные изменения ДН антенны. Использование рассеивающей линзы расширяет ДН в Е-плоскости. Наличие небольших дополнительных стенок в модификации “Н-стенки” позволяет в Н-плоскости сузить ДН. Расширяющийся коньковый переход способствует расширению ДН в Е-плоскости.

Показано, что использованием всех рассмотренных модификаций вместе можно сформировать ДН, приемлемую для использования данной антенны в качестве облучателя коллиматора. При этом полученная ДН имеет более стабильную форму и размеры в главных плоскостях в полосе частот с коэффициентом перекрытия 2,25, чем у исходной широкополосной антенны.



(a) H-плоскость



(b) E-плоскость

Рисунок 8 – Сечения ДН Satimo SH 2000 (Сплошная) и модификации “Объединение” (пунктирная)

Список литературы

- [1] Компактные полигоны для измерений характеристик рассеяния объектов. / Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. - М.: Наука, 2007. - 266 с.
- [2] Radar cross section. / Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T - Boston: SciTech Publishing, 1993, second edition - 477 p.
- [3] Антенны УКВ. / Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. - М.: «Связь», 1977. Ч. 1 - 383 с.
- [4] Modern antenna design. / Milligan T. - 2nd ed. Wiley: New Jersey, 2005. - 614 p.
- [5] Brachat P. Sectorial pattern synthesis with primary feeds // IEEE Trans. on Anten. and Prop. - 1994. - Т. 42 (4). - p. 484-491.
- [6] Olver A.D., Xiang J. Design of profiled corrugated horns. // IEEE Trans. on Anten. and Prop. - 1988. - Т. 36 (7). - p. 936-940.
- [7] Ерухимович Ю.А., Тимофеева А.А. Комбинированные рупорные облучатели для зеркальных антенн // - Труды НИИР. - 1979. - № 1.
- [8] Глазман Я. Д., Коршунова Н. В., Тимофеева А. А. Улучшение осевой симметрии главного лепестка и снижение уровня бокового излучения рупорных антенн. // Труды НИИР. - 1990. - № 3.
- [9] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. Расфазированный рупорный облучатель с изломом образующей и со скосом апертуры для коллиматора МАК-5М. Журнал Радиоэлектроники. - 2016. - №6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun16/5/text.html>
- [10] Hoel K. V., Kristoffersen S. Characterization of variable density 3D printed materials for broadband GRIN lenses // 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. - 2017. - p. 2643-2644. doi:[10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073364](https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073364).
- [11] Hoel K.V., Ignatenko M., Kristoffersen S., Lier E., Filipovic D. S. 3-D Printed Monolithic GRIN Dielectric-Loaded Double-Ridged Horn Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - 2020. - Т. 68 (1). - p. 533-539. doi:[10.1109/TAP.2019.2938563](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938563).
- [12] Balabuha N. P., Menshikh N. L., Sakhno A. D., Shapkina N. E. Mathematical Simulating of Electromagnetic Field in the Quiet Zone of Pyramidal and Conical Tapered Anechoic Chambers: Comparison of Results // 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Hangzhou, China. - 2021. - p. 2552-2561. doi:[10.1109/PIERS53385.2021.9694914](https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9694914).
- [13] Miyata K. A 12 GHz-band planar waveguide array antenna for compact range application-a preliminary study // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. -1996. - Т. 44 (4). - p. 588-589. doi:[10.1109/8.489312](https://doi.org/10.1109/8.489312).
- [14] Menshikh N. L., Fedorov S. A., Gilmutdinov R. V. Application of Antenna - Lens System for Measurement of Bistatic Parameters of Materials // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). - 2022. - p. 1-4. doi:[10.1109/ICCT56057.2022.9976617](https://doi.org/10.1109/ICCT56057.2022.9976617).
- [15] Piksa, Petr & Zvanovec, Stanislav & Cerny, Petr. Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves // -Radioengineering. -2011. - Т. 20. - p. 270-275.
- [16] Wang C., Li E., Zhang Y. Guo G. Ridged Horn Antenna With Adjustable Metallic Grid Sidewalls and Cross-Shaped Back Cavity // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. - 2016. - Т. 5. - p. 1221-1225. doi:[10.1109/LAWP.2015.2502578](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2502578).

**FORMATION OF THE RADIATION PATTERN OF A BROADBAND
ANTENNA FOR USING IT AS IRRADIATOR**

Gilmutdinov R.V.*¹, Menshikh N.L.¹, Solosin V.S.¹, Fedorov S.A.¹

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

* psevduch777@gmail.com

Abstract

In this paper options for upgrading the Satimo SH2000 broadband antenna by changing the shape of the ridge transition, using side walls and installing a phase corrector in the form of a diverging lens are presented. A computer model of the original antenna was created. It was experimentally confirmed that the developed electrodynamic model of the antenna makes it possible to obtain radiation characteristics with sufficient accuracy. Using the method of integral equations in the FEKO software package, the influence of types of antenna modifications on the shape of the radiation pattern was studied. A comparison was made of the radiation patterns obtained as a result of modifying the antenna with the corresponding patterns of the original antenna in the frequency band. Three modifications of the antenna are considered. The use of a phase corrector expands the radiation pattern in the E-plane. The use of small additional walls in the H-wall modification makes it possible to narrow the radiation pattern in the H-plane. The expanding ridge transition also contributes to the expansion of the radiation pattern in the E-plane, and makes it possible to reduce the asymmetry of the shape of the radiation pattern in the main planes. It is shown that upgrading the antenna makes it possible to create a radiation pattern that is more stable in shape and size in a frequency band with an overlap coefficient of more than two. The resulting shape of the radiation pattern allows us to consider the modernized antenna as a collimator irradiator.

Key words: antenna Vivaldi, FEKO, irradiator, phase corrector, radiation pattern
