

УДК 621.396.677.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ РЕШЕТКИ ВАН-АТТА

Ф. С. Топалов

Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет,
347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2018 г., после доработки – 22 января 2019 г.

Аннотация. В данной работе предложена цилиндрическая система активного гашения (САГ) рассеянного поля на основе решетки Ван-Атта с устройством управления, содержащей встречно включенные управляемые усилители и фазовращатели с независимым управлением. Численно, методом конечных элементов, исследован частный случай рассеяния плоской Н-поляризованной электромагнитной волны на упрощенной модели предложенной цилиндрической САГ. Упрощение состояло в исключении устройства управления и формирования нуля ЭПР путем подбора мощности и начальной фазы сигнала в портах антенн САГ. Приведены диаграммы направленности и диаграммы обратного рассеяния цилиндрической САГ при различных углах минимизации. Показано, что мощность сигнала в антеннах, формирующая ноль ЭПР на заданном угле минимизации на заданной частоте, пропорциональна величине ЭПР цилиндрической САГ с согласованными антеннами. Так же показано что независимое управление фазовращателями позволяет поддерживать самофокусировку решетки Ван-Атта при отклонении угла падения от нормали. Результаты расчета показывают, что на частоте 10 ГГц предложенная САГ позволяет снижать ЭПР цилиндра с заданного направления на величину до -50 дБ. При этом моностатический сектор рабочих углов гашения по уровню -10 дБ составляет от 16° до 3° в зависимости от угла минимизации, а ширина полосы пропускания составляет от 600 МГц до 300 МГц так же в зависимости от угла минимизации.

Ключевые слова: снижение ЭПР, малозаметность, цилиндр, система активного гашения, решетка Ван-Атта, моностатическая диаграмма рассеяния.

Abstract. In this paper, cylindrical active cancellation system (ACS) based on controllable waveguide Van Atta reflector with circulators, power amplifiers and phase shifters is proposed. Scattering characteristics of a horizontally polarized plane electromagnetic wave on a conducting cylinder with ACS are investigated numerically using Ansys HFSS. The simplified numerical model without controlling device allowed to find RCS minimization condition through the search of signal power and phase in ACS antennas ports. It is shown that power in ports, which is required to minimize RCS, is proportional to the RCS value of the ACS with matched antennas. It is shown that independent phase shifters controlling can maintain Van Atta array self-focusing at not normal angles of incidence. Results obtained at 10 GHz show that it is possible to minimize cylinder RCS more than -50 dB in desired direction. Worst case -10 dB dumping in 3° angle sector and 300 MHz band is achieved. In addition, the radiation patterns and scattering diagrams of the ADS for different minimization angles are shown.

Key words: RCS minimization, stealthiness, cylinder, active damping system, Van Atta array, monostatic RCS.

Введение

Традиционно снижение эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов осуществляется двумя основными способами: за счет выбора малоотражающей формы или за счет применения радиопоглощающих покрытий [1]. Метаматериалы, появившиеся сравнительно недавно, так же нашли применение в снижении ЭПР [2-6], но ограничением их использования может стать резонансный характер поглощения. Альтернативным способом снижения заметности является применение интерференционных покрытий, при которых ЭПР объекта снижается за счет взаимного ослабления радиоволн, противофазно отраженных от поверхности покрытия и поверхности объекта в некотором заданном направлении [7]. Этот принцип так же применим в случае, когда

снижение ЭПР системы «антенна – место установки» достигается за счет интерференции двух составляющих рассеянного поля: антенной составляющей – обусловленной переизлучением самой антенны, и структурной составляющей – не связанной с принятой энергией ЭМП, и определяемой формой антенны и местом ее установки [8]. Практически это реализуется, например, с помощью подбора комплексной нагрузки [9] – такие системы называются системами пассивного гашения (СПГ). Они характеризуются большим количеством антенн требуемых для снижения ЭПР, и, так же как и метаматериалы, непрерываемой полосой частот поглощения. Гораздо большие возможности по управлению характеристиками рассеяния достижимы с помощью систем активного гашения (САГ), в которых используется генерация или же переизлучение зондирующего сигнала с дополнительным усилением и регулируемым фазовым набегом [10, 11].

Внимание исследователей в последнее время направлено на разработку и исследование СПГ на основе нагруженных антенн. Они широко представлены для плоских конструкций [12, 13], цилиндрических [14], а также конформных профилю крыла [15], в то время как САГ рассмотрены менее подробно. Приведенное в [11] численное сравнение характеристик рассеяния плоской волноводной САГ и СПГ показало, что САГ позволяет осуществлять более глубокое гашение обратного рассеяния (более чем на 20 дБ, против 10 дБ у СПГ), требуя при этом меньшее число антенн. Это так же подтверждают экспериментальные исследования САГ на основе плоской 8-ми элементной антенной решетки с циркуляторами и фазовращателями [10], где было достигнуто 25 дБ снижение ЭПР. При этом каждая из антенн САГ была подключена к отдельному управляющему элементу (связке циркулятор-фазовращатель-усилитель-циркулятор).

В данной работе предложена САГ, выполненная в конфигурации решетки Ван-Атта. Такой подход позволяет не только использовать зондирующий сигнал в качестве компенсационного, что исключает необходимость в генерации компенсирующего сигнала, но и позволяет модулировать

переизлучаемый сигнал с целью постановки различного рода помех [18]. Известна реализация системы гашения на основе микрополосковой решетки Ван-Атта, в которой используется переизлучение зондирующего сигнала [16], однако ее нельзя отнести к классу систем активного типа, так как в ней отсутствуют активные усилительные элементы, а требуемый набег фаз реализуется длиной микрополосковой линии.

Не смотря на повышающуюся сложность алгоритма и устройства управления, высокая эффективность снижения ЭПР объектов с помощью САГ требует дальнейшего их исследования, в особенности применительно к объектам изогнутой формы, как к наименее исследованным.

Целью работы является численное исследование направленных и полосовых свойств рассеяния цилиндрической САГ на основе управляемой решетки Ван-Атта.

Постановка задачи

В данной работе под САГ понимается пара антенн, подключенных к устройству управления (УУ). САГ установлена на сплошной круговой проводящий цилиндр радиусом R , на поверхности которого на угловом расстоянии γ в обе стороны от положительного направления оси Ox расположены антенны $A1$ и $A2$ (рисунок 1). Будем называть ее цилиндрической САГ.

Управляющее устройство САГ, к которому подключены антенны $A1$ и $A2$, состоит из двух циркуляторов (Π_1, Π_2), обеспечивающих двунаправленность системы, и пары последовательно включенных: усилители с регулируемым усилением ($У_{12}, У_{21}$) и управляемые фазовращатели (Φ_{12}, Φ_{21}). Похожая конфигурация с линейным расположением элементов решетки Ван-Атта и без фазовращателей ранее была описана применительно к области РЭП [19].

Только в частном случае, когда управление фазовращателями происходит синхронно (т.е. общим управляющим сигналом), такая решетка Ван-Атта сохраняет за собой свойство самофокусировки.

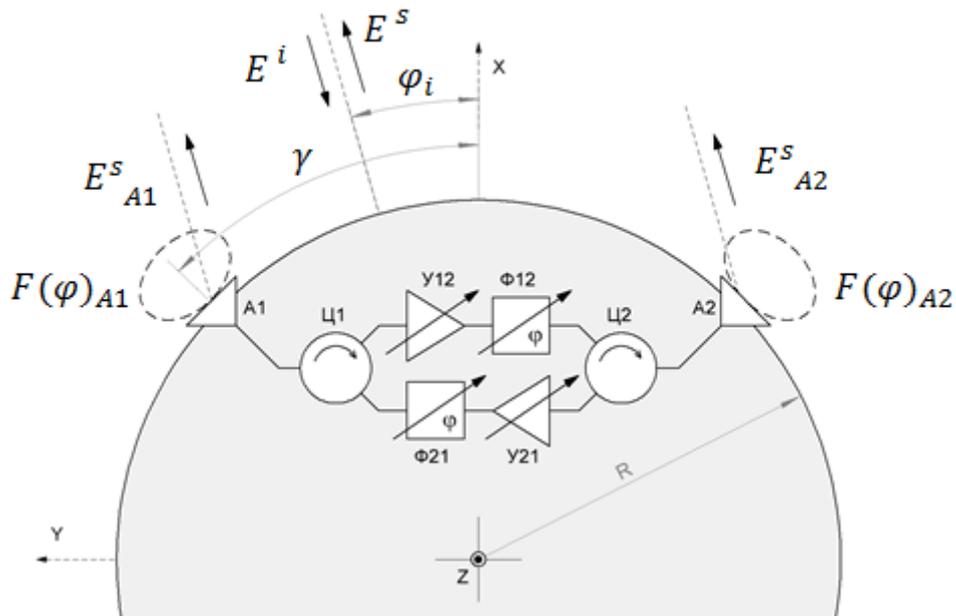


Рисунок 1 – Функциональная схема цилиндрической САГ

Для одиночного элемента решетки Ван-Атта, казалось бы при любом направлении падения волны должна соблюдаться самофокусировка. Но анализ антенной составляющей из приближенного решения задачи рассеяния плоской волны на двумерной модели волноводной решетки Ван-Атта на цилиндре [17] показывает, что с увеличением угла падения происходит расфокусировка решетки, и главный лепесток ДН отстает по углу от направления угла падения. Как будет показано далее, независимое управление фазовращателями, предлагаемое в этой статье, позволяет сохранить самофокусировку при любых углах падения в «поле видимости» решетки.

Цилиндрическая САГ с направления $\varphi_i = 0 \dots 45^\circ$, $\theta_i = 90^\circ$ облучается плоской монохроматической Н-поляризованной волной единичной амплитуды с частотой f_i . Падающее поле обозначим как \vec{E}^i ; поле рассеянное цилиндром при полном поляризационном приеме как \vec{E}^s , а компенсационное поле [15], излученное (переизлученное) антеннами A1 и A2, обозначим как суперпозицию полей $\vec{E}_{A1}^s + \vec{E}_{A2}^s$ (рисунок 1).

Для минимизации обратного рассеяния (формирования нуля ЭПР) в пространстве перед цилиндром в выбранном направлении должно выполняться следующее условие [20]:

$$(\vec{E}_{A1}^S + \vec{E}_{A2}^S) + \vec{E}^S = 0$$

где $(\vec{E}_{A1}^S + \vec{E}_{A2}^S)$ – суммарная антенная составляющая;

\vec{E}^S – структурная составляющая.

Численная модель

Поскольку в САПР HFSS отсутствует возможность включать в модель усилительные устройства и фазовращатели с управляемыми характеристиками, а также по причине того, что необходимо рассчитать КСВ антенн САГ, перейдем к следующей численной модели (рисунок 2).

В численной модели формирование нуля ДОР в заданном направлении будет выполняться путем поиска величин мощностей $P_{s1}; P_{s2}$ и начальных фаз $\varphi_{s1}; \varphi_{s2}$ сигналов, подводимых к антеннам A1 и A2 соответственно.

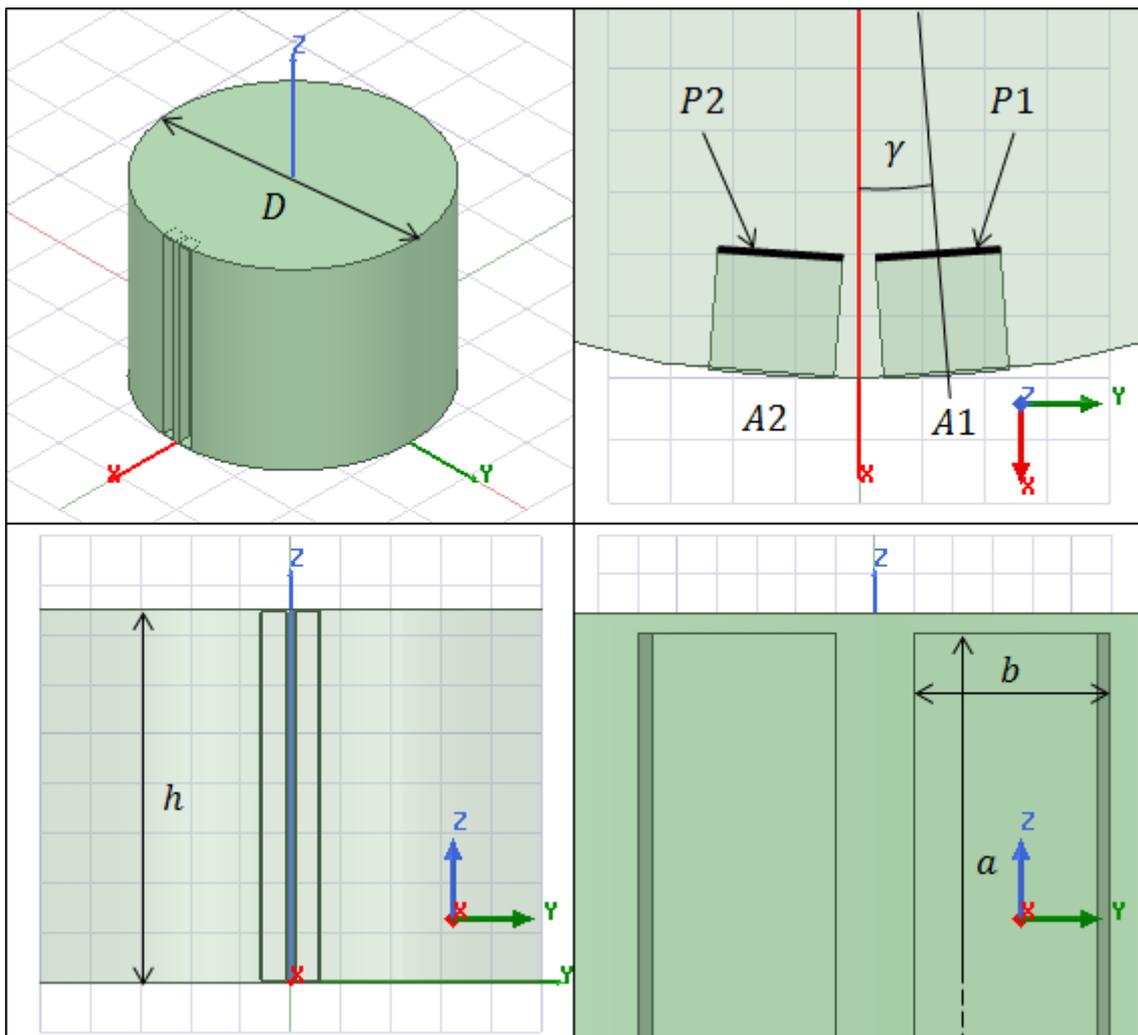


Рисунок 2 – Численная модель цилиндрической САГ

Исследование проводилось на частоте $f_i = 10$ ГГц ($\lambda_i = 30$ мм). Радиус цилиндра $R = D/2 = 100$ мм, высота цилиндра $h = 150$ мм. Для выбранной частоты f_i радиус цилиндра $R > 3\lambda_i$, а его высота $h = 5\lambda_i$. Антенны A1 и A2 представляют собой открытый конец волновода с размером апертуры $a = 148$ мм, $b = 10$ мм; и глубиной волновода 10 мм. В плоскости портов P1, P2 заданы волноводные порты Wave Port с типом волны H_{10} . Угол $\gamma = 4^\circ$ выбран по следующим причинам. При таком значении γ антенны A1 и A2 уже не пересекаются, т.е. это минимальный конструктивно возможный целочисленный угол при выбранном b ; а расстояние между антеннами составляет $d = 2R \sin(\gamma) \approx 0.46\lambda_i$, что еще удовлетворяет условию отсутствия дифракционных лепестков в ДН $d < \lambda_i / 2$. ДН антенной решетки $F(\varphi)_s$ при равноамплитудном и синфазном возбуждении имеет явно выраженный максимум, а коэффициент усиления (КУ) в осевом направлении составляет 16.5 дБ (рисунок 3). Здесь же изображены ДН каждой из антенн ($F(\varphi)_{A1}$ и $F(\varphi)_{A2}$) в присутствии другой, подключенной к согласованной нагрузке. В численной модели режим согласованной нагрузки антенны A1 или A2 реализуется, когда мощность P_s , подводимая к волноводному порту соответствующей антенны, равна нулю.

Коэффициент стоячей волны антенн на частоте 10 ГГц составляет КСВ = 1.58; а развязка между антеннами $S_{12}, S_{21} = -16$ дБ.

Когда обе антенны находятся в режиме согласованной нагрузки $P_{s1,s2} = 0$, то САГ превращается в СПГ. На рисунке 4 изображена амплитудная (σ_0) и фазовая (φ_{σ_0}) диаграмма обратного рассеяния (ДОР) сплошного металлического цилиндра, и амплитудная (σ_a) и фазовая (φ_{σ_a}) ДОР цилиндрической САГ с согласованными антеннами. Видно, что такая СПГ снижает ЭПР цилиндра более чем на 3 дБ в секторе $\varphi_i = \pm 15^\circ$.

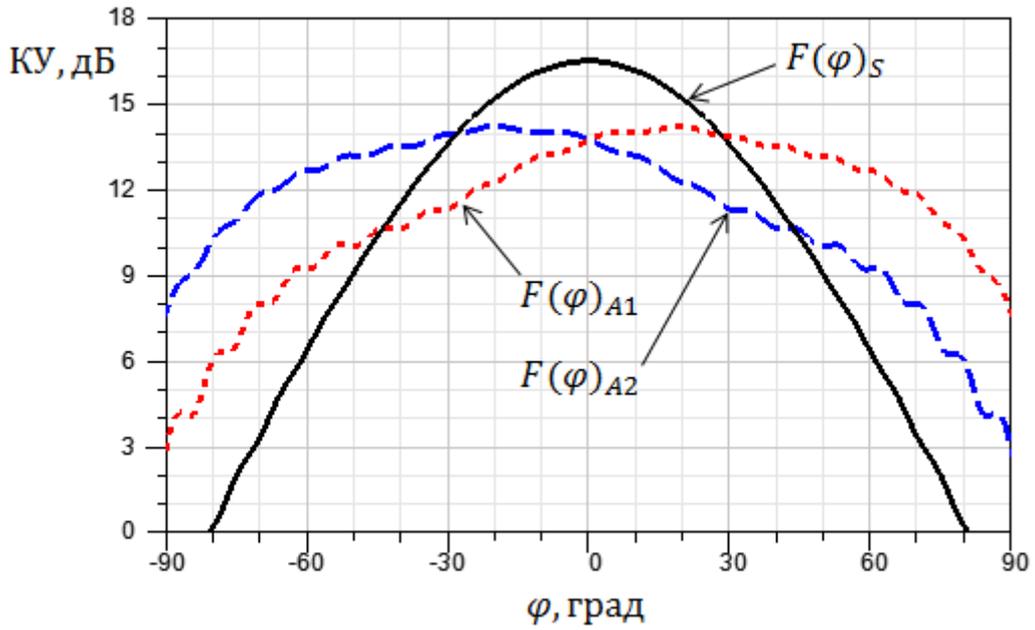


Рисунок 3 – ДН КУ антенн A1, A2, и суммарная равноамплитудная синфазная ДН КУ антенной решетки

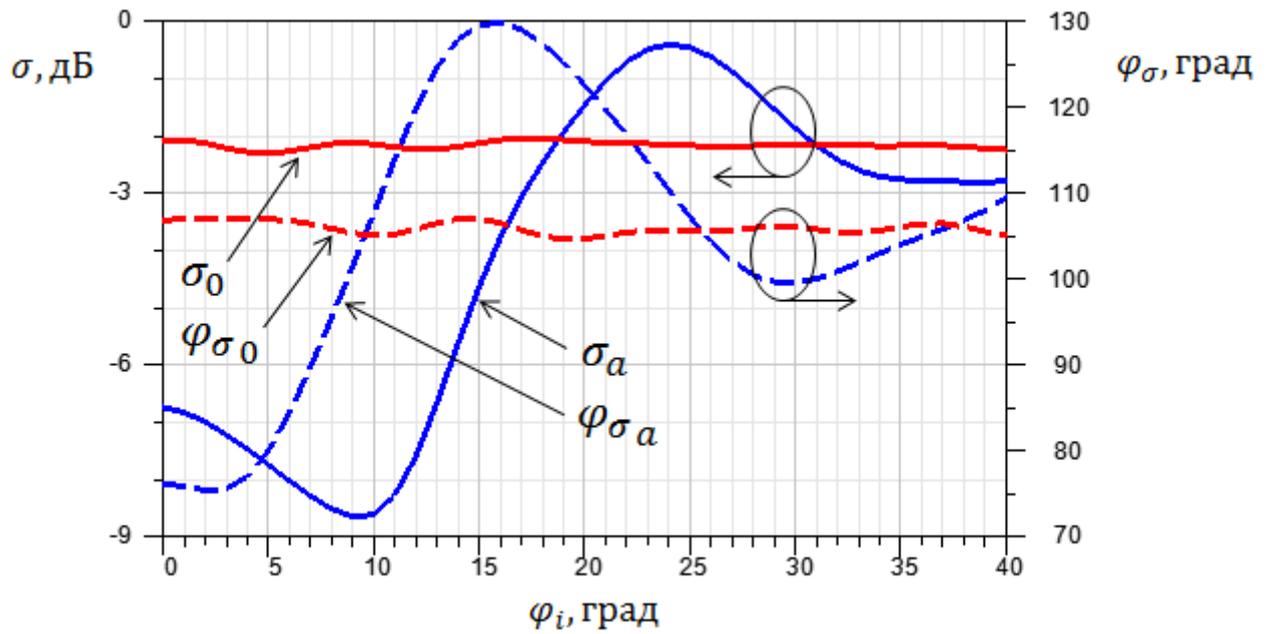


Рисунок 4 – Амплитудная и фазовая ДОР сплошного цилиндра, и цилиндрической САГ с согласованными антеннами

Условия формирования нуля ЭПР

В САПР HFSS с помощью модуля Optometrics были найдены мощности P_{s1} , P_{s2} и начальные фазы сигнала φ_{s1} , φ_{s2} который необходимо подать к антеннам A1 и A2 для минимизации обратного рассеяния, на заданном угле минимизации φ_m , на частоте f_i (рисунок 5). Здесь углом минимизации φ_m называется такой угол падения волны φ_i , в направлении которого в данный момент реализуется ноль ЭПР (выполняется снижение обратного рассеяния).

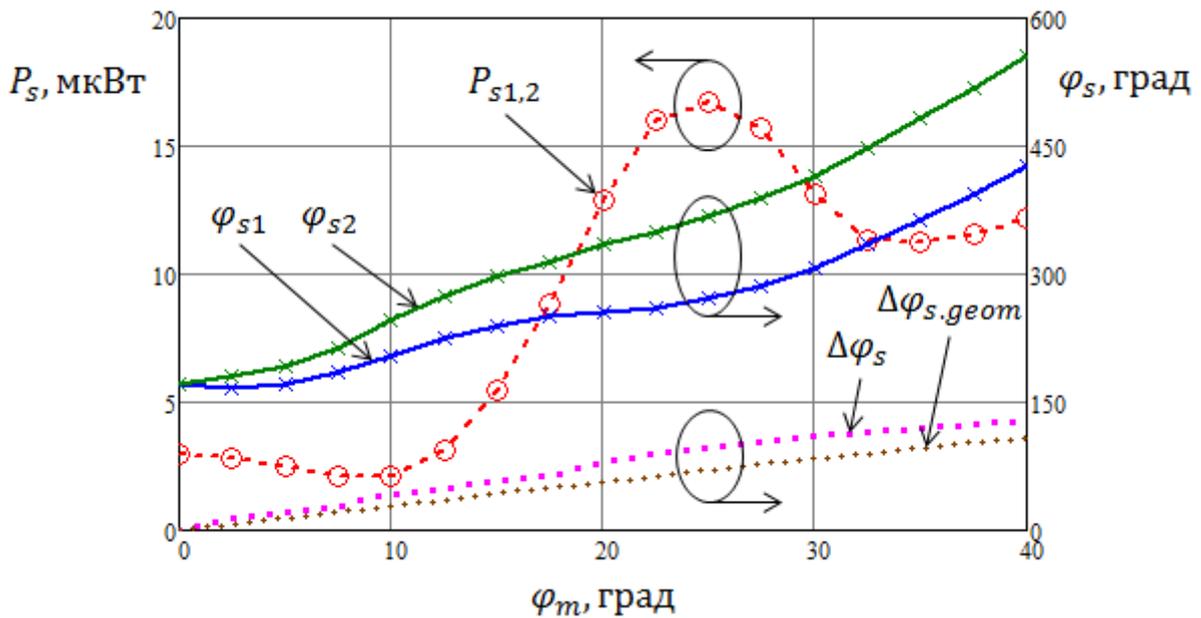


Рисунок 5 – Мощность $P_{s1,2}$ и начальная фаза φ_{s1} , φ_{s2} сигнала в антеннах A1 и A2 требуемые для реализации нуля ЭПР

Процедура нахождения значений $P_{s1,2}$ и $\varphi_{s1,2}$ (рисунок 5) выполнялась следующим образом. Задается требуемое значение угла минимизации φ_m , в направлении которого необходимо реализовать ноль ЭПР, и устанавливается угол облучения $\varphi_i = \varphi_m$. Затем, следующим образом, выполняется фазирование максимума ДН решетки в направлении φ_m , что как бы имитирует самофокусировку решетки Ван-Атта. При равноамплитудном возбуждении решетки $P_{s1} = P_{s2}$ и при фиксированном значении φ_{s1} , с помощью

параметризации/оптимизации ищется такое значение $\Delta\varphi_s = \varphi_{s2} - \varphi_{s1}$, при котором максимум основного лепестка ДН антенной решетки $F(\varphi)_s$ будет находиться в направлении $\varphi = \varphi_m$. На этом этапе значения мощности $P_{s1} = P_{s2}$ и начальной фазы φ_{s1} выбираются произвольно. Семейство ДН решетки при разных φ_m изображено на рисунке 6.

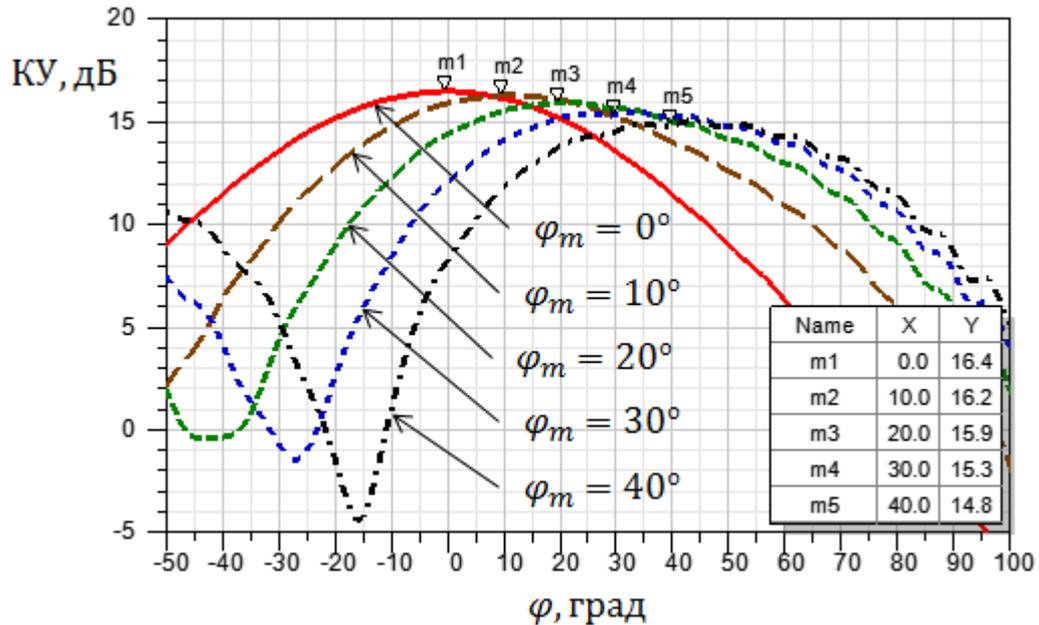


Рисунок 6 – Семейство ДН КУ цилиндрической САГ при различных φ_m

Далее, путем параметризации φ_{s1} в диапазоне $0^\circ \div 360^\circ$ и при $\varphi_{s2} = \varphi_{s1} + \Delta\varphi_s$, где $\Delta\varphi_s$ принимает найденное ранее значение, ищется минимум обратного рассеяния $\min(\sigma)$ в направлении φ_m . Иными словами, при сохранении фазировки антенны $\Delta\varphi_s$, ищется такое значение фазы излученного решеткой сигнала (такое положение фазового фронта), при котором он (сигнал) будет компенсировать поле, рассеянное цилиндром. Аналогично, путем параметризации $P_{s1} = P_{s2}$ ищется такое значение мощности сигнала, подводимого к антеннам А1 и А2, при котором наблюдается минимум обратного рассеяния в направлении φ_m . Для более точного нахождения

$P_{s1} = P_{s2}$ и $\varphi_{s1}, \varphi_{s2}$ можно воспользоваться оптимизацией этих параметров в окрестности значений, полученных в результате параметризации.

Анализируя график $P_s(\varphi_m)$ (рисунок 5) можно сделать вывод, что мощность, требуемая для компенсации обратного рассеяния, прямопропорциональна величине обратного рассеяния σ_a цилиндрической САГ с согласованными антеннами (рисунок 4), т.е. качественно повторяет его. Это означает, что для минимизации обратного рассеяния амплитуда антенной составляющей должна равняться амплитуде структурной составляющей. График изменения разности фаз $\Delta\varphi_s(\varphi_m)$ (рисунок 5) проходит через ноль и имеет нарастающий характер близкий к линейному. Если сравнить $\Delta\varphi_s(\varphi_m)$ с набегом фазы за геометрическую разность хода лучей $\Delta\varphi_{s,geom}(\varphi_m) = kd \sin(\varphi_m)$, где $d = 2R \sin(\gamma)$ – период решетки, длина хорды соединяющей центры апертур антенн А1 и А2; $k = 2\pi / \lambda_i$ – волновое число, то видно, что $\Delta\varphi_s(\varphi_m)$ возрастает на 30% быстрее чем $\Delta\varphi_{s,geom}(\varphi_m)$. Такое опережение связано с необходимостью поддержания свойства самофокусировки, и реализуется путем независимого управления фазовращателями. Так, например, при работе в положительной области углов φ , с ростом угла падения φ_i , фазовый сдвиг вносимый фазовращателем Ф21 будет больше, чем сдвиг в Ф12.

Найденные значения $P_{s1}, P_{s2}, \varphi_{s1}, \varphi_{s2}$ позволяют определить коэффициенты усилителей У12, У21 и вносимые сдвиги фаз Ф12, Ф21.

Диаграммы обратного рассеяния

На рисунке 7 приведено семейство ДОР, полученных при углах минимизации ЭПР $\varphi_m = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$. Горизонтальная пунктирная линия соответствует уровню моностатической ЭПР металлического цилиндра σ_0 (рисунок 4). Видно, что предложенная САГ позволяет достигать глубокого, практически полного гашения (до -50 дБ) рассеянного поля для любого угла из сектора $\varphi_m = \pm 40^\circ$. При этом ДОР имеет наибольшую ширину при $\varphi_m = 0^\circ$,

которая уменьшается с ростом φ_m . Так ширина ДОР по уровню -10 дБ составляет 16° при $\varphi_m = 0^\circ$, и 3° при $\varphi_m = 40^\circ$.

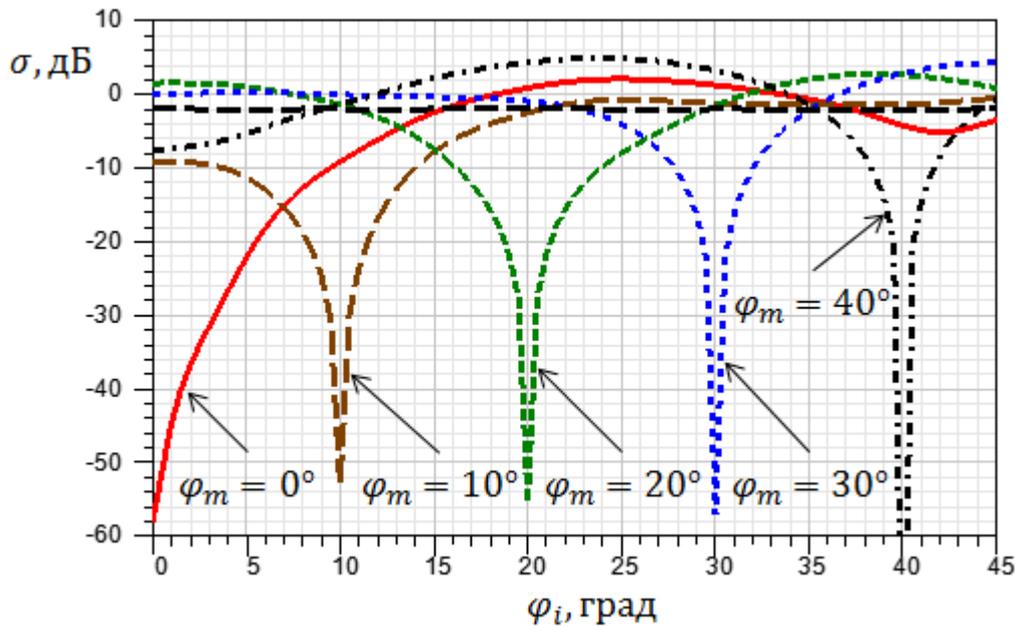


Рисунок 7 – Семейство ДОР при различных углах минимизации φ_m

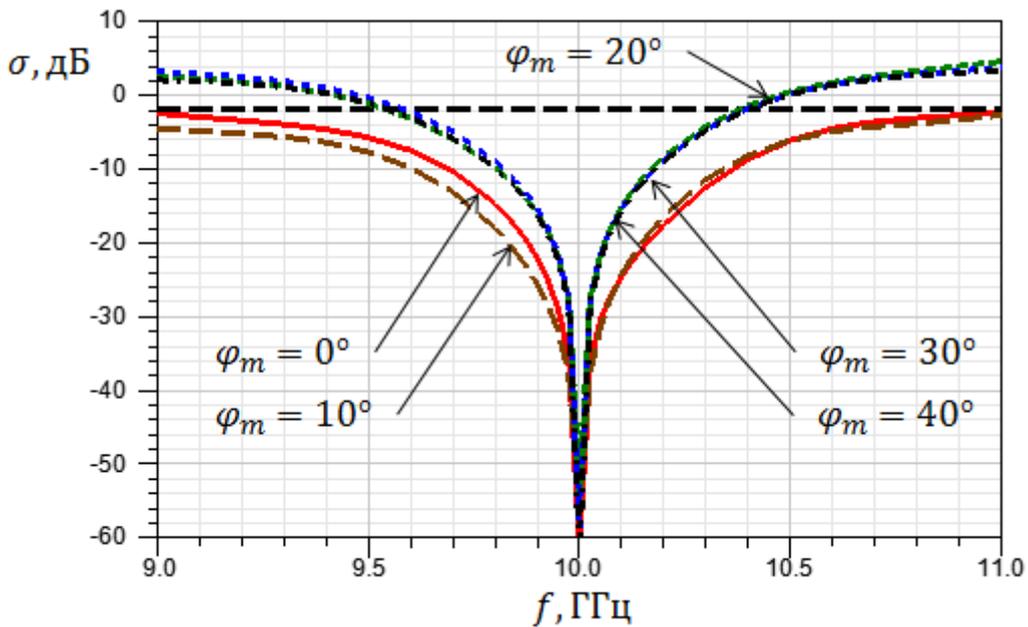


Рисунок 8 – ЧХ ДОР при различных углах минимизации φ_m

Рассчитанная частотная характеристика (ЧХ) при $\varphi_m = \varphi_i = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ (рисунок 8) показывает возможность работы системы в узкой полосе частот в окрестности центральной частоты. Видно, что

ширина полосы пропускания системы по уровню -10 дБ, так же, как и ширина ДОР, зависит от угла минимизации φ_m и уменьшается с ростом последнего: 600 МГц при $\varphi_m = 0^\circ$, и 300 МГц при $\varphi_m = 40^\circ$.

Заключение

Исследована цилиндрическая система активного гашения с устройством управления характеристиками рассеяния. Рассчитаны условия при которых осуществляется гашение рассеянного поля в заданном направлении. Численно исследованы характеристики рассеяния, и показано, что при заданном направлении облучения для данного цилиндра возможно гашение -10 дБ в узком секторе углов (до 3°) в узкой полосе частот (до 300 МГц), однако благодаря управляющему устройству осуществима динамическая перестройка САГ для работы на других частотах и с других ракурсов облучения. Результаты работы могут быть использованы на практике для предварительной оценки работы САГ. Дальнейшие исследования могут быть направлены на увеличение ширины гашения диаграммы рассеяния, и экспериментальные исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 16-19-10537).

Литература

1. Семенихина Д. В., Юханов Ю. В., Привалова Т. Ю. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: Учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 196.
2. Wengang Chen, Constantine A. Balanis, Craig R. Birtcher, Anuj Y. Modi Cylindrically Curved Checkerboard Surfaces for Radar Cross-Section Reduction // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17, Issue 2. P. 343-346.
3. Ali Shahi, Ali Abdolali Cylinder Scattering Pattern Manipulation for Dual-Polarized Radar Cross-section Reduction Using Inhomogeneous Metasurface // Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). 2017. P. 1691-1696.

4. Ladislau Matekovits, Yogesh Ranga, Trevor S. Bird, Karu P. Esselle, Mario Orefice Anisotropic cloaking of a metallic cylinder // International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Applications (iWAT). 2014. – P. 216-219.
5. Junming Zhao, Boyu Sima, Nan Jia, Cheng Wang, Bo Zhu, Tian Jiang, Yijun Feng Achieving flexible low-scattering metasurface based on randomly distribution of metaelements // Optics Express. 2016. Vol. 24, Issue 24. P. 27849-27857.
6. Semenikhina D. V., Semenikhin A. I., Yukhanov Y. V., Klimov A. V. Binary structures similar to checkerboard, with anisotropic impedance metasurface for RCS reduction // International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). 2016. P. 307-310.
7. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004. – С. 152.
8. Ерохин Г. А., Кочержевский В. Г. Исследование возмущающего действия приемных антенн на плоскую волну // Радиотехника и электроника. 1993. №6. С. 1006-1015.
9. Schindler J. K., Mack R. B., Blacksmith P. The Control of Electromagnetic Scattering by Impedance Loading // Proceedings of the IEEE. 1965. Vol. 53, Issue 8. – P. 993-1004.
10. Narihiro Nakamoto, Toru Takahashi, Toru Fukasawa, Naofumi Yoneda RCS Reduction of Array Antenna Using Circulator and Phase Shifter // IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). 2017. P. 190-193.
11. Yukhanov Yu. V., Privalova T. Yu., Gevorkyan A. V. Damping of the Scattered Field of a Plane Object by a Waveguide Array // Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). 2017. P. 2047-2052. DOI [10.1109/PIERS.2017.8262087](https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262087)
12. Tadashi Chisaka, Naobumi Michishita, Yoshihide Yamada Reduction of RCS Values of a Patch Antenna by Resistive Loading // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2013. P. 1968-1969.

13. Латыпова А. Ф., Рыжиков А. Г. Разработка радиопоглотителя на основе печатных биконических вибраторов, нагруженных резисторами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014.– Т. 10, №. 4. С. 88-92.
14. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V. Control of RCS of Cylindrical Microstrip Antenna Array // Proceedings ELMAR. 2014. P. 1-4.
15. Геворкян А. В. Гашение полей рассеяния объектов системой антенн Вивальди : дис. канд. тех. наук: 05.12.07. Таганрог, 2016.
16. Youngsub Kim, Woosung Lee, Young Joong Yoon Monostatic RCS Reduction using Modified Van Atta Array // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2013. P. 1222-1223.
17. Yukhanov Y. V., Privalova T. Y., Kryuk E. V., Merglodov I. V. Scattering Characteristics of the Van-Atta Waveguide Array on the Surface of a Cylinder // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). 2018. P. 1597-1602. DOI 10.23919/PIERS.2018.8597929
18. Topalov F. S., Yukhanov Y. V., Ilin I. V., Privalova T. Y. Controlling Van-Atta Array Scattering Characteristics with HITTITE HMC247 Phase Shifter // Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). 2017. P. 2065-2068. DOI [10.1109/PIERS.2017.8262089](https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262089)
19. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. М.: Вузовская книга, 2013. С. 136-137.
20. A. I. Semenikhin, A. I. Chernokolpakov Active Cancellation of Radar Cross Section of Large Aircraft Using Conformal 2-Port Magnetic T-Shaped Antenna // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). 2017. DOI [10.1109/RSEMW.2017.8103623](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2017.8103623)

Для цитирования:

Ф. С. Топалов. Численное исследование характеристик рассеяния цилиндрической системы активного гашения на основе управляемой решетки Ван-Атта. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/12/text.pdf>
 DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.12