

УДК 621.396.67

Входные характеристики фазированных антенных решеток над проводящей цилиндрической поверхностью

И.А. ФАНЯЕВ

Произведен поиск волнового сопротивления подводящих линий передачи для минимизации энергетических потерь методом адаптивного роя частиц, по критерию минимальности КСВ на всех входах. Для ФАР над цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной и горизонтальной поляризации при изменении разных геометрических параметров оптимальные волновые сопротивления линий передачи могут достигать значений до 400 Ом, при этом КСВ не превышает значения 3,3. Выбор оптимальных параметров позволяет снизить КСВ до 1,5.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, цилиндрическая поверхность, входное сопротивление, коэффициент стоячей волны, сектор возбуждения.

A search was made for the wave impedance of the supplying transmission lines to minimize energy losses by the adaptive particle swarm optimization, by the criterion of the minimum SWR at all inputs. For a phased antenna array near a cylindrical surface of radiators vertical and horizontal polarizations, when different geometric parameters are varied, the optimum wave impedances of transmission lines can reach values up to 400 ohms, while the SWR does not exceed 3.3. Choosing the optimal parameters allows you to reduce SWR to 1.5.

Keywords: phased antenna array, cylindrical surface, input impedance, standing wave ratio, excitation sector.

Введение. Цилиндрические антенные решетки (АР) обладают рядом свойств, отсутствующих у линейных и плоских антенн. Осесимметричные АР позволяют реализовать широкоугольное сканирование луча без изменения характеристик решетки в секторе сканирования, расширить рабочую полосу частот, совместить излучающее полотно фазированной антенной решетки (ФАР) с поверхностью различных объектов и т. д.

Для любой ФАР немаловажным аспектом является знание входных характеристик. В линейных или же плоских АР при синфазном излучении входное сопротивление излучателей одинаково. Изменение входного сопротивления происходит при качании луча (при линейном изменении фазового фронта), тем самым изменяя КСВ на их входах. Чем больше отклонение луча, тем большее происходит рассогласование с питающей линией передачи, что, в принципе, и ограничивает сектор сканирования. В цилиндрических АР неравномерность входного сопротивления излучателей присутствует изначально из-за специфики фокусирования луча. А сканирование лучом может осуществляться за счет поворота возбуждающего сектора. Поскольку входные импедансы излучателей в секторе возбуждения оказываются различными и отличаются (иногда значительно) от волнового сопротивления подводящих линий передачи, то для минимизации энергетических потерь возникает задача оптимизации значения этого волнового сопротивления. В плане практической реализации это означает, что на вход каждого излучателя должно быть добавлено трансформирующее устройство. Подобные вопросы поднимались в работе [1], однако они носили оценочный характер. Расчет входного сопротивления излучателей антенной решетки, расположенной над проводящей цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной поляризации показан в работе [2], но оптимизации значений входных сопротивлений не проводилось.

Постановка задачи. В данной работе реализуется поиск волнового сопротивления подводящих линий передачи, по критерию минимальности КСВ на всех входах ФАР. Он

осуществлен с помощью оптимизационного интеллектуального метода, а именно, использовался адаптивный метод роя частиц (APSO) [3]. Все необходимые математические выкладки задачи о полях ФАР над проводящей цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной (V-типа) и горизонтальной (H-типа) поляризации приведены в [4]–[5].

Для расчетов была взята кольцевая АР с параметрами: $N = 32$ – число излучателей в кольце; $\alpha = 120^\circ$ – сектор возбуждения; $\Delta = 0,25\lambda$ – расстояние между излучателем и цилиндром; $V_{inc} = 1$ В – напряжение на входе излучателя; параметры излучателя: $w = 0,05\lambda$, $L = 0,5\lambda$, $h = 0,01\lambda$. Луч фокусировался в направлении $\theta_0 = \pi/2$, $\varphi_0 = 0$. Все расчеты производились в программе Mathcad.

Сопrotивление линии передачи при разных периодах решетки. На рисунке 1 приведены зависимости сопротивлений линий питания от периодов ФАР над проводящей цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной (рисунок 1, а–б) и горизонтальной (рисунок 1, в–г) поляризации, найденные методом APSO при различных периодах решетки по критерию минимума КСВ на всех входах.

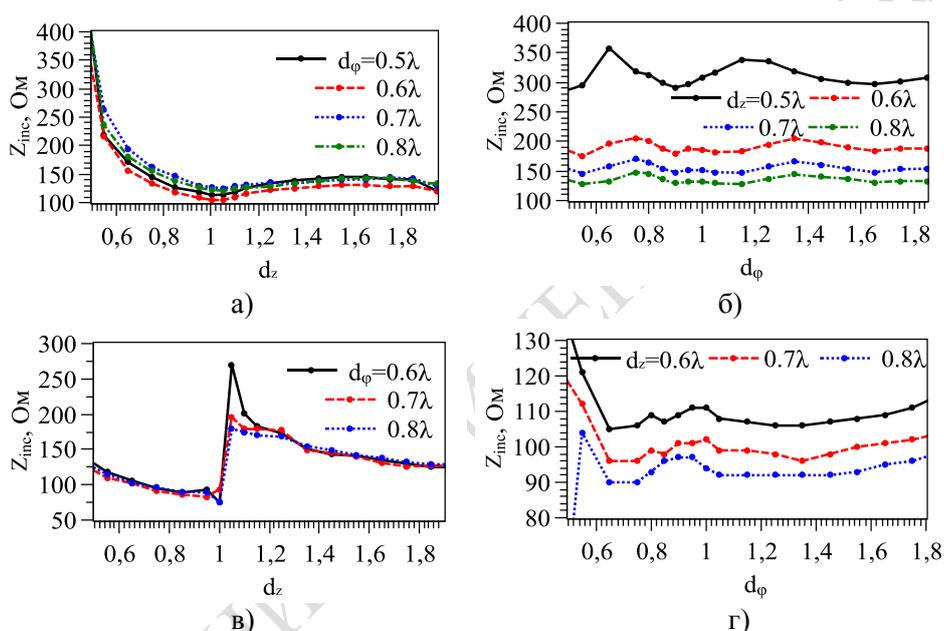


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления линии передачи от периодов решетки

Анализируя рисунок 1, а–б, видим, что при малых d_z сопротивление Z_{inc} принимает большие значения (до 275 Ом). До $d_z = 1\lambda$ сопротивление Z_{inc} плавно спадает, а потом вплоть до $d_z = 1,95\lambda$ существенно не изменяется. Каждая кривая при изменении d_ϕ ведет себя одинаково, с небольшими отклонениями, в значениях Z_{inc} присутствуют небольшие колебания.

Из рисунка 1, в видно, что сопротивление Z_{inc} в определенной области значений d_z носит резонансный характер. При $d_z = 1,05\lambda$ имеется четко выраженный максимум сопротивления. Оно достигает значений выше 250 Ом. Характер поведения кривых слабо зависит от d_ϕ . А вот при изменении d_ϕ (рисунок 1, г), таких явлений не наблюдается. Кривые Z_{inc} ведут себя достаточно стабильно во всем исследуемом диапазоне значений d_ϕ .

КСВ при различных периодах решетки. Использование метода адаптивного роя частиц при нахождении сопротивления линии передачи позволило добиться низких значений КСВ. Анализ полученных значений КСВ для ФАР над цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей вертикальной поляризации показал, что самый максимальный КСВ является 1,76 при $d_z = 0,65\lambda$ и $d_\phi = 0,7\lambda$. Самый минимальный КСВ является 1,28 при $d_z = 1,15\lambda$ и $d_\phi = 0,8\lambda$. Также, как и сопротивление линии передачи, КСВ носит колебательный характер. КСВ при увеличении d_ϕ носит спадающий характер и достигает значений 1,09.

Исследования КСВ на входах ФАР над цилиндрической поверхностью из полосковых излучателей горизонтальной поляризации показали, что из-за связи сопротивления линии

передачи и КСВ при значениях $d_z = 1\lambda$ или же чуть большим 1λ в КСВ имеется четко выраженный максимум. Самое большое значение КСВ является 3,3 при $d_z = 1,05\lambda$ и $d_\phi = 0,6\lambda$. Минимальный КСВ равен 1,05, который получается при $d_z = 0,95\lambda$ и $d_\phi = 0,8\lambda$.

В целом, все полученные значения КСВ лежат на достаточно низком уровне, что свидетельствует о хорошей согласованности линии передачи и излучателей.

КСВ в зависимости от расстояния между излучателями и цилиндрической поверхностью при различных периодах решетки. Рассмотрим влияние расстояния между излучателями и цилиндрической поверхностью Δ (в длинах волн) на поиск оптимальных значений КСВ.

Для удобства представления результатов выходных характеристик были использованы следующие обозначения: d_z – строка, d_ϕ – столбец.

$$\begin{bmatrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \\ \textcircled{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \\ \textcircled{3} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \textcircled{0.5\lambda, 0.5\lambda} & \textcircled{0.5\lambda, 0.6\lambda} & \textcircled{0.5\lambda, 0.7\lambda} \\ \textcircled{0.6\lambda, 0.5\lambda} & \textcircled{0.6\lambda, 0.6\lambda} & \textcircled{0.6\lambda, 0.7\lambda} \\ \textcircled{0.7\lambda, 0.5\lambda} & \textcircled{0.7\lambda, 0.6\lambda} & \textcircled{0.7\lambda, 0.7\lambda} \end{bmatrix}$$

Зависимость волнового сопротивления линии передачи от расстояния между излучателями и цилиндром для двух ФАР из излучателей V- и H-типа представлена на рисунке 2.

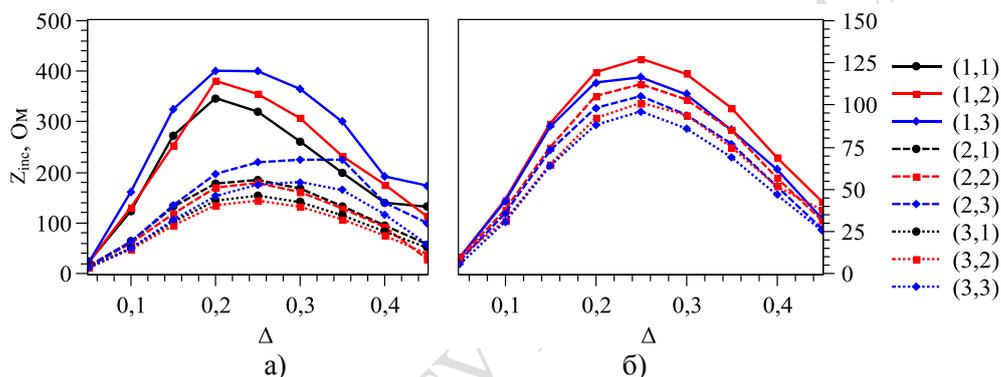


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления линии передачи от Δ при различных периодах антенной решетки: а) – излучатели V-типа; б) – излучатели H-типа

Как видно из рисунка 2, сопротивления линии передачи имеют явно выраженный максимум при $\Delta = 0,25\lambda$. Для ФАР из излучателей V-типа сопротивление достигает 400 Ом, а для ФАР из излучателей H-типа – до 125 Ом.

На рисунке 3 представлены зависимости КСВ от расстояния между излучателем и цилиндром при различных периодах решетки. Здесь N_s – номер возбуждаемого излучателя.

Как видно из рисунка 3, при увеличении Δ происходит увеличение КСВ. При очень близком расположении излучателей к цилиндрической поверхности можно добиться очень низких показаний КСВ (ниже 1,1). От центрального излучателя $N_s = 6$ КСВ носит симметрично зеркальный характер. В полученных результатах прослеживается определенная характерность, а именно: для ФАР из излучателей V-типа (рисунок 3, а–в) вне зависимости от значений Δ и при разных периодах АР на 3 и 9 излучателях всегда получается низкий КСВ, а на 2, 6 и 10 излучателях практически всегда, с увеличением Δ КСВ принимает большие значения. Это можно объяснить тем, что при возбуждении заданным амплитудно-фазовым распределением входное сопротивление каждого излучателя получается неодинаковым и то близким, то значительно отличимым от найденного сопротивления линии передачи. Такой волнообразный характер проявляется и в других АР (при увеличении N). Также взаимная связь и бегущие вдоль цилиндра волны влияют на входное сопротивление каждого излучателя, тем самым не позволяют добиться хорошего согласования с синтезированным сопротивлением линии передачи.

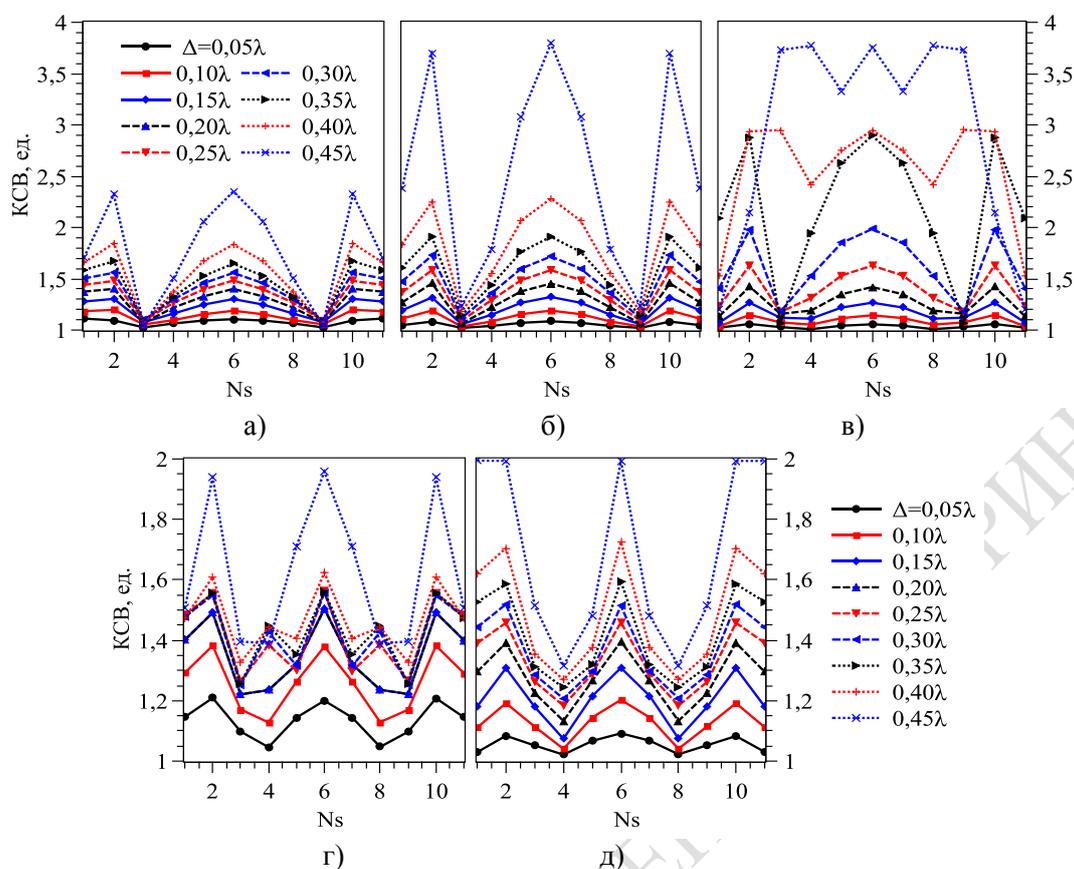


Рисунок 3 – КСВ на входах излучателей при разных расстояниях между цилиндром и излучателями: а) – (3,1); б) – (3,2); в) – (3,3); г) – (1,2); д) – (1,3)

Следует также отметить, что не только при увеличении Δ , но и при увеличении d_φ , уровень КСВ становится большим по сравнению с предыдущими значениями. В среднем, Δ можно брать до $0,3\lambda$ при этом уровень КСВ в большинстве рассмотренных случаев не превысит 2.

Для ФАР из излучателей Н-типа (рисунок 3, г–д) также прослеживается та же закономерность, а именно, вне зависимости от значений Δ при периодах АР $d_z = 0,5\lambda$ и $d_\varphi = 0,7\lambda$ на 4 и 8, а также на крайних излучателях образуется минимальный КСВ. А вот предпоследние излучатели 2, 10 и центральный 6 – всегда имеют максимальный КСВ, и чем больше Δ , тем выше значения КСВ. Однако, если Δ брать до $0,3\lambda$ при всех рассмотренных вариациях периодов КСВ не превысит 1,55.

КСВ в зависимости от сектора возбуждения при различных периодах решетки. Рассмотрим, как влияет на поиск оптимального уровня КСВ на входах двух ФАР, если изменять сектор возбуждения решеток, $\alpha \in [2,5^\circ; 202,5^\circ]$.

На рисунке 4 представлена зависимость сопротивления линии передачи от сектора возбуждения при различных периодах АР.

Из рисунка 4, а видно, что сопротивление линии передачи носит плавно изменяющийся характер в небольших пределах, кроме кривых (1,1), (1,2), (1,3). Для них сопротивления достигают больших значений и лежат в пределах от 240 до 440 Ом.

Из рисунка 4, б следует, что сопротивление линии передачи носит плавно изменяющийся, спадающий характер. В целом, значения не превышают 130 Ом.

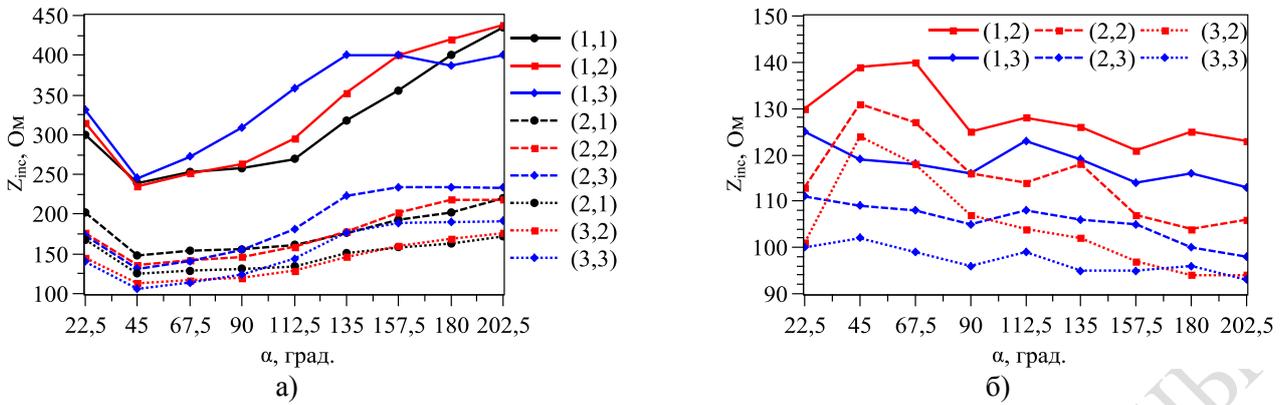


Рисунок 4 – Зависимость сопротивления линии передачи от сектора возбуждения при различных периодах антенной решетки

На рисунке 5 приведена зависимость КСВ от сектора возбуждения при различных периодах решетки. При $\alpha = 22,5^{\circ}$ возбуждался только один излучатель, ввиду этого на рисунке 5 значение КСВ представлено одной точкой.

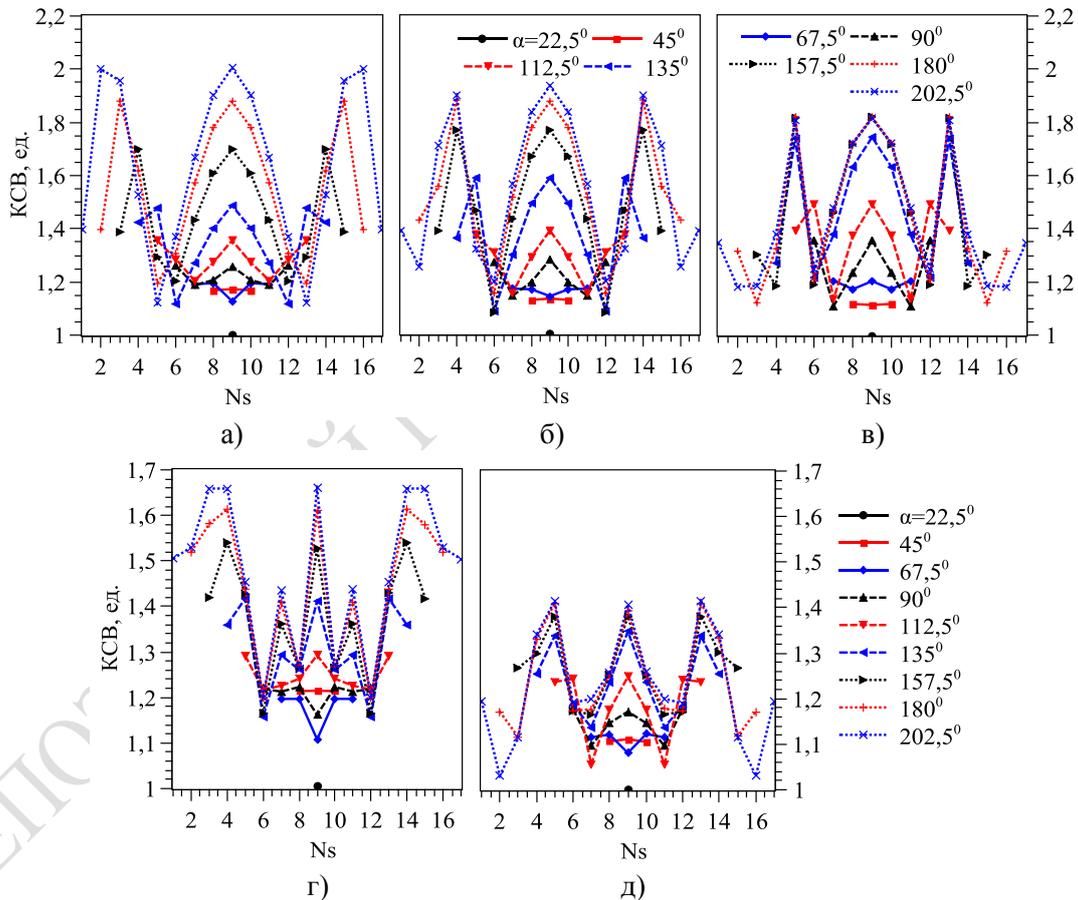


Рисунок 5 – КСВ на входах излучателей при разных секторах возбуждения: а) – (3,1); б) – (3,2); в) – (3,3); г) – (3,2); д) – (3,3)

Рисунок 5 показывает, что с увеличением сектора α увеличивается число возбужденных излучателей и уровень КСВ. Максимальный уровень КСВ не превышает 2. Как и в предыдущих результатах имеются симметричные относительно центрального излучателя провалы и пики значений КСВ в определенных номерах излучателей.

Для ФАР из излучателей V-типа (рисунок 5, а-в) при увеличении d_z уровень КСВ практически не изменяется, а при увеличении d_ϕ уровень КСВ снижается от 2 до 1,85.

Для ФАР из излучателей Н-типа (рисунок 5, $z-d$) анализ результатов показал, что максимальный уровень КСВ не превосходит 1,7 при $d_z = 0,7\lambda$ и $d_\varphi = 0,6\lambda$. КСВ носит осциллирующий характер при любом значении α . При этом положения максимумов и минимумов не зависят от сектора возбуждения.

Для обеих ФАР, варьируя период и сектор возбуждения, можно достичь уровня КСВ отвечающего необходимым требованиям.

Заключение. В данной работе произведен поиск волнового сопротивления подводящих линий передачи для минимизации энергетических потерь интеллектуальным методом (APSO), по критерию минимальности КСВ на всех входах. Численные исследования показали, что для ФАР над цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной поляризации при изменении разных геометрических параметров оптимальные волновые сопротивления линий передачи могут достигать значений до 400 Ом, при этом КСВ не превышает значения 1,75.

Для ФАР над цилиндрической поверхностью из излучателей горизонтальной поляризации при изменении разных геометрических параметров и $d_z < \lambda$, $d_\varphi < \lambda$ оптимальные волновые сопротивления подводящих линий передачи лежат в пределах от 30 Ом до 130 Ом, при этом КСВ не превышает значения 1,5.

Для обеих ФАР, варьируя период и сектор возбуждения, при фиксированном расстоянии между излучателем и цилиндрической поверхностью равным $0,25\lambda$, можно достичь уровня КСВ, отвечающего необходимым требованиям для подобных сканирующих антенных систем.

Литература

1. Воскресенский, Д.И. Выпуклые сканирующие антенны / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев, В.С. Филипов. – М. : Сов. радио, 1978. – 304 с.
2. Herper, J.C. Element pattern of an axial dipole in a cylindrical phased array. Part I : Theory / J.C. Herper, A. Hessel, B. Tomasic // Transactions on Antennas and Propagation. – 1985. – V. 33, № 3. – P. 259–272.
3. Patterns antennas arrays synthesis based on adaptive particle swarm optimization and genetic algorithms / B. Kadri [et al.] // International Journal of Computer Science Issues. – 2013. – V. 10, № 2. – P. 21–26.
4. Фаняев, И.А. Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной поляризации / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6(87). – С. 191–198.
5. Фаняев, И.А. Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей горизонтальной поляризации. Часть 1: Методика электродинамического моделирования / И.А. Фаняев, В.П. Кудин // Антенны. – 2016. – № 2. – С. 3–10.