

Design of 3 GHz Stripline Ferrite Circulator for Radar Applications

Arie Setiawan, Yudi Yuliyus Maulana, Yaya Sulaeman, Teguh Praludi, Yana Taryana

Research Center for Electronics and Telecommunication (P2ET-LIPI)
Indonesian Institute of Sciences
Bandung, Indonesia

Abstract— This paper presents a design of three port stripline circulator using magnetized ferrite. The design is proposed to comply a radar system at 3 GHz operation. The geometry design consists of two ferrite planar disk resonators separated by a disk center conductor symmetrically coupled by three port of transmission line. In the design process, the ferrite material is magnetized perpendicularly to the plane of the device by a static magnetic field to obtain all three port are matched. The ferrite of Ni-Zn material, the saturation magnetization of 2400 Gauss and ferromagnetic linewidth of 200 Oe were used for disk resonator and Cu metal as conductor of the transmission line. The EM simulation software was used to simulate, optimize and record the design parameter in order to achieve good insertion loss (S21), return loss (S11) and isolation (S31). The simulation experiment has done by the difference of magnetization. The best result recorded for 3 GHz at 1600 Oe of magnetization, namely; - 0.411 dB of S21, -28.111 dB of S11, and -41.831 dB of S31.

Keywords—*circulator; stripline; saturation; magnetization; ferrite; insertion loss; return loss; isolation*

I. INTRODUCTION

The three-port circulator is a unique nonreciprocal passive device of symmetrical junction having one typical input port, one output port, and one decoupled port[1]. It has the property that a wave incident in port 1 is coupled to port 2 only, a wave incident in port 2 is coupled to port 3 only, and so on[2]. The device one of key part for microwave telecommunication systems and have been used for many applications. For the application, the three-port circulator can be also used as isolator as shown in Fig.1. When the circulator functioned as an isolator, the device can protect other Radio Frequency (RF) components from excessive signal reflection. The RF circulator may also be used in a duplexing system to control transmission and reception of microwave energy with single antenna[3]. Fig.1. describe an operating system of the ferrite circulator. The rotation line represents the magnetic fields direction and the signal when applied to any port of this circulator. If a wave incident at port 1 and port 2 is well matched, the wave will emerge at port 2. The outputs remain the same as these devices are symmetrically constructed, it makes no difference which port is the input of the circulator[3]. A circulator is a useful device for signal routing or separation between components. The Y-Junction Circulator, the three-port version of ferrite junction that can be constructed in rectangular waveguide or stripline are commonly used[4].

Аннотация — В этом документе представлена конструкция трех-портового полоскового циркулятора с использованием намагниченного ферритового цилиндра. Конструкция предлагается для использования в радиолокационной системе на частоте 3 ГГц. Конструкторская схема состоит из двух ферритовых цилиндрических резонаторов, разделенных кольцом центрального проводника, симметрично связанным с тремя портами линии передачи. В процессе проектирования ферриты намагничены перпендикулярно плоскости статическим магнитным полем для получения согласованности по трем портам. Для резонатора были использованы никель-цинковые Ni-Zn ферриты, намагниченность 2400 гаусс, ширина линии ферромагнитного резонанса 200 Э, в качестве проводника используется медь. EM программное обеспечение было использовано для моделирования, оптимизации и записи конструктивных параметров для достижения хороших вносимых потерь (S21), затухания отражения (S11) и изоляции (S31). Моделирование сделано по разности намагниченности. Самый лучший результат для 3 ГГц получен при 1600 Э намагниченности, а именно; -0,411 дБ S21, -28,111 дБ S11 и -41,831 дБ S31.

Ключевые слова — *циркулятор; полосковый; saturation; намагниченность; феррит; вносимые потери; затухание отражения; венгиль*

I. ВВЕДЕНИЕ

Трехпортовый циркулятор - уникальное незаменимое пассивное устройство симметричного соединения, имеющее один типичный входной порт, один выходной порт и один разъединенный порт [1]. Принцип действия - волна, попадающая в порт 1, связана только с портом 2, волна попадающая в порт 2 связана только с портом 3 и т. д. [2]. Прибор является одним из ключевых устройств для микроволновой системы связи и используется во многих системах. В различных схемах, трехпортовый циркулятор также может быть использован как изолятор, как показано на рис.1. Когда циркулятор используется как изолятор, он может защищать другие радиочастотные (RF) компоненты от чрезмерного отражения сигнала. Радиочастотный циркулятор может также использоваться в дуплексной системе с одной антенной для управления передачей и приемом СВЧ волн [3]. Рисунок 1. Показывает принцип работы ферритового циркулятора. Линия вращения показывает направление магнитных полей и сигнала при приложении к любому порту этого циркулятора. Если волна попадает в порт 1 и порт 2 хорошо согласован, волна будет появляться в порту 2. Выходы остаются такими же, так как прибор сделан симметрично, то нет разницы, какие порты являются входом циркулятора[3]. Циркулятор используется как прибор для маршрутизации сигнала или его разделения между компонентами. Наиболее распространен циркулятор Y-образного перехода, трехпортовый вариант ферритового перехода, который может быть построен в виде прямоугольного волновода или полосковой линии[4].

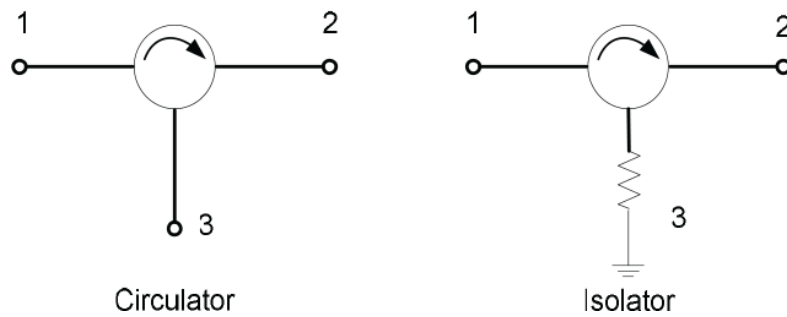


Fig. 1. Three-port circulator/isolator

Microwave circulator has many uses in communication and radar systems[5]. The Circulator can be applied to the systems that required a shared antenna such as phased array antenna module[6]. The ferrite circulator is typically having 3 ports (input, output and decoupled port). Circulator allows the maximum power transfer from one port to another port in a way that the power flows from input port to output port and third port will be isolated. Ferrite circulator has not replaced by IC devices[7] and still gain much attention topic to study. Several documents, paper, and books from years have a deal with the design of circulators. The purpose of introduction of this report is to provide the phenomenological description of the operation of this device. Research center for Electronics and Telecommunication, Indonesian Institute of Sciences (P2ET-LIPI) for several years has started research in the development of Radar Technology[8][9]. For supporting the research, the development in circulator technology is required to study. In this paper, a design of stripline ferrite circulator that suitable for radar systems at 3GHz operation was proposed.

II. DESIGN OF STRIPLINE CIRCULATOR

The geometry of the stripline circulator is shown in Fig.2. It consists of two ferrite planar disk resonators separated by a metal disk conductor symmetrical coupled by three conductor line with 120 degrees apart from the disk center. The ferrite disk is surrounded by a dielectric material with the same permittivity as the ferrite, but there are ferrite circulator arrangements, where the dielectric property of the dielectric material is higher than the ferrite, so the device can be radically reduced[10]. But, the air was used as the dielectric material in this paper. Usually, external permanent magnets located on either side of the component provide the magnetic DC field ensuring a longitudinal magnetic polarization and to align magnetic spins out of the plane, because with an external static magnetic field applied the ferrite materials gain permeability tensor characteristics[7].

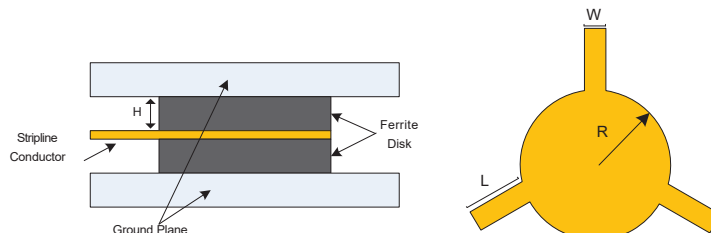


Рис. 1. 3-х портовый циркулятор/вентиль.

СВЧ-циркулятор имеет много применений в системах связи и радиолокации[5]. Циркулятор может быть применен к системам, в которых требуется общая антенна, например модуль фазированной антенной решетки[6]. Ферритовые циркуляторы до сих пор не были вытеснены их полупроводниковыми аналогами[7] и по-прежнему привлекают к себе большое внимание. Конструкция ферритовых циркуляторов описана в большом количестве документов, работ и книг разных лет. Целью написания отчета является обоснование уникальности работы этого устройства.

Научно-исследовательский центр электроники и телекоммуникаций Индонезийского института наук (P2ET-LIPI) в течение нескольких лет вел исследования по разработке радиолокационных технологий[8] [9]. Для продолжения исследований, необходимо развивать изучение технологии циркуляции. В данной работе предложена конструкция полоскового ферритового циркулятора, предназначенного для работы в составе радиолокационных систем на частоте 3 ГГц.

II. КОНСТРУКЦИЯ ПОЛОСКОВОГО ЦИРКУЛЯТОРА

Конструкция полоскового циркулятора показана на рис.2. Он состоит из двух ферритовых плоских дисковых резонаторов, разделенных металлическим дисковым проводником, симметрично соединенным трехпроводной линией на расстоянии 120 градусов от центра диска. Ферритовый диск окружен диэлектрическим материалом с той же диэлектрической проницаемостью, что и феррит, но существуют ферритовые циркуляционные устройства, где диэлектрические свойства диэлектрического материала выше, чем у феррита, поэтому устройство может быть радикально уменьшено[10]. В качестве диэлектрического материала в этой статье был использован воздух. Как правило, внешние постоянные магниты, расположенные по обе стороны от компонента, обеспечивают магнитное поле постоянного тока, обеспечивающее продольную магнитную поляризацию и выравнивание магнитных спинов вне плоскости, поскольку при приложении внешнего статического магнитного поля ферритовые материалы приобретают тензорные характеристики проницаемости[7].

One of important to consider in the design of ferrite circulator are the material properties, the overall performance circulator depends on the material parameters. In this paper, the ferrite material was chosen first then the other parameters were calculated based on chosen parameters of the ferrite. Ni-Zn ferrite material was used for the performance simulation, the ferrite with high permeability and high frequency are widely used in the telecommunications, electronics and various sensors[11]. The simulation parameters of the ferrite are shown in Table I.

Applying the data from the chosen ferrite material, the radius of ferrite disk can be found. The radius of ferrite disk was calculated using (1) for the center frequency of 3 GHz.

Одним из важных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании циркулятора, являются свойства ферритового материала, от него зависит общая производительность циркулятора. В этой статье сначала был выбран ферритовый материал, а затем уже другие параметры были рассчитаны на основе выбранных параметров феррита. Для моделирования рабочих характеристик использовался ферритовый материал Ni-Zn, такие ферриты, с высокой проницаемостью и высокой частотой широко используются в телекоммуникациях, электронике и различных сенсорах [11]. Параметры моделирования феррита приведены в таблице I.

Применяя данные из выбранного ферритового материала, можно найти радиус ферритового диска. Радиус ферритового диска рассчитывался с использованием (1) для центральной частоты 3 ГГц.

$$kR = x \quad (1)$$

Where,

$$k = \frac{2\pi f(\epsilon_{r,ferrite}\mu_{eff,ferrite})^{1/2}}{c} \quad (2)$$

R is the radius of the ferrite disk, k is the wave number, and x is the first circulation conditions for using a disk resonator[12]. To find k, with the ferrite dielectric constant (ϵ_r) of 12.4, the ferrite effective permeability (μ_{eff}) must be calculated first, where,

R - радиус ферритового диска, k - волновое число, а x - первые условия циркуляции для использования дискового резонатора [12]. Чтобы найти k с диэлектрической проницаемостью феррита (ϵ_r) равной 12,4, сначала необходимо рассчитать эффективную проницаемость феррита (μ_{eff}), где

$$\mu_{eff} = (\mu^2 - \kappa^2)/\mu \quad (3)$$

The parameters κ and μ are the element of the polder tensor. For the operation region of the ferrite disk is below resonance, $\mu \approx 1$, $\kappa \approx f/f_0$ [13]. Where $f = 3$ GHz and $f_0 = f\sqrt{2}$. Derived from (2) and (3) resulting for the $k = 223.8$ and $k/\mu = 0.71$ which corresponding to $kR = 1.3$ with $\Psi = 0.5$, where Ψ are angular angle approximation [1]. So, for the simulation process this approximation was used, resulting the Radius R = 5.81 mm.

For the width of conductor lines (W) should not be very small, as it will lead increased losses[14]. For consideration the width of conductor line following,

Параметры κ и μ являются элементом тензора пoldera. Для области действия ферритового диска ниже резонанса, $\mu \approx 1$, $\kappa \approx f/f_0$ [13]. Где $f = 3$ ГГц и $f_0 = f\sqrt{2}$. Полученные результаты из (2) и (3) уравнения приводят к $k = 223,8$ и $k/\mu = 0,71$, что соответствует $kR = 1,3$ с $\Psi = 0,5$, где Ψ -приближение углового угла [1]. Таким образом, для процесса моделирования было использовано это приближение, в результате чего радиус R = 5,81 мм.

Для ширины проводящих линий (W) не должно быть очень мало, так как это приведет к увеличению потерь [14]. Для рассмотрения ширины проводящей линии,

$$W = 2R \sin \Psi \quad (4)$$

Property	Values
Dielectrical Constant (ϵ_r)	12.4
Saturation magnetization ($4\pi M_s$)	2400 Gauss
Resonance Linewidth (ΔH)	200 Oe
Dielectric loss ($\tan\delta$)	0.0006
Lande G	2.2

Based on the value of propagation constant radius and angular angle. Using (4) the width of strip conductor was calculated, resulting $W = 5.65$ mm. For the length of conductor transmission line is using quarter wavelength formula as follow,

$$L = \lambda/4 = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

the calculated length of conductor transmission line section using (5) is $L = 7$ mm. Another parameter that important to find is the thickness of the ferrite. The ferrite thickness is calculated using analytical line impedance for stripline structure to meet the matching impedance of 50 ohm. The thickness was found close to $H = 2$ mm.

The calculated parameter of R, W, and L, H ferrite, are the initial design parameter which later possible need for optimizations after the structure of the circulator was modeled to get the best result at the center frequency of 3 GHz. Table II shows the initial design parameter of the ferrite circulator.

III. SIMULATION OF STRIPLINE CIRCULATOR

Based on the calculated of R, W, L, and H, the Y-junction ferrite circulator was designed as shown in Fig.3. Then, using EM simulator the designed circulator was characterized to see the performance of the return loss (S11), insertion loss (S21) and isolation (S31). Fig.3. shows the initial design model of the ferrite circulator.

The ferrite circulator is transmitting power from port 1 to port 2 with the other port (port 3) become isolated, from port 2 to port 3, and port 3 to port 1 while the other isolated. To achieve this, the circulator must be magnetized properly so the rotation of standing wave could perform. Using different magnetization in the simulation generate the best value for the center frequency of 3 GHz while the other parameters are not changed. Fig.4. shows S-parameters of the simulation for different magnetization.

TABLE II. INITIAL DESIGN PARAMETERS

Property	Values
Radius Ferrite (R)	5.81 mm
Ferrite Disk Thickness (H)	2 mm
Width Conductor Lines (W)	5.65 mm
Length Conductor Lines (L)	7 mm
Conductor Thickness	0.65 mm

На основе значения постоянного радиуса распространения и углового угла. Используя уравнение (4) была рассчитана ширина полосового проводника, в результате чего $W = 5,65$ мм. Для длины проводника линии передачи используется четверть длины волны по формуле:

расчетная длина участка линии электропередачи с использованием уравнения (5) равна $L = 7$ мм. другим важным параметром является толщина феррита. Толщина феррита рассчитывается с использованием аналитического линейного импеданса для полосовой структуры, чтобы соответствовать сопротивлению равному 50 ом. Толщина была найдена близкой к $H = 2$ мм.

Расчетные параметры феррита R, W и L, H являются начальными конструктивными параметрами, которые впоследствии могут быть скорректированы после моделирования циркулятора для получения наилучшего результата на центральной частоте 3 ГГц. В таблице II приведены исходные конструктивные параметры ферритового циркулятора.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯТОРА

ПОЛОСОВОГО

Основываясь на расчетах R, W, L и H, ферритовый циркулятор Y-перехода был спроектирован так, как показано на фиг.3. Затем, после моделирования ЭМ на основе разработанного циркулятора стало видно характеристики возвратных потерь (S11), вносимых потерь (S21) и изоляции (S31). На рис.3. показана исходная расчетная модель ферритового циркулятора.

Ферритовый циркулятор передает мощность от порта 1 к порту 2, при этом другой порт (порт 3) становится изолированным, от порта 2 к порту 3 и от порта 3 к порту 1, в то время как другой изолирован. Для достижения этой цели циркулятор должен быть намагничен должным образом, чтобы вращение стоячей волны могло выполняться. Используя различную намагниченность в моделировании генерируют лучшее значение для центральной частоты 3 ГГц, в то время как другие параметры не изменяются. На рис.4. показаны S-параметры моделирования для различной намагниченности.

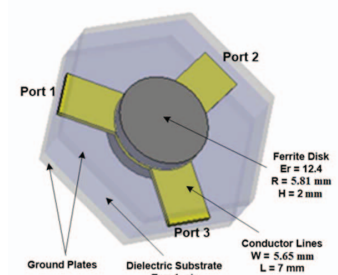


Fig. 3. 3D model of stripline circulator.

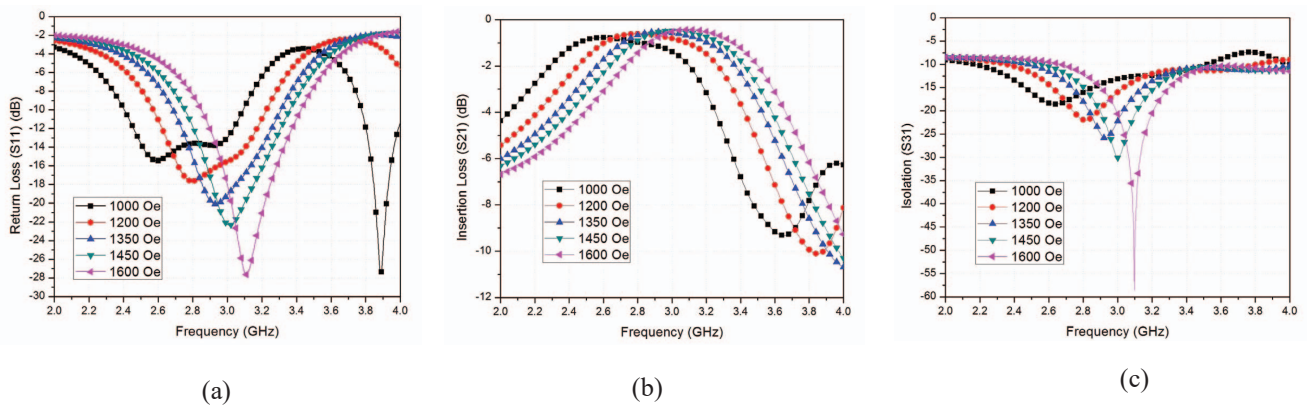


Fig. 4. Graphic S-parameters of the simulation for different magnetization (a) S11, (b) S21, and (c) S31.

From the Fig.4. it is shown that the magnetization of 1450 Oe gives the best result for return loss, insertion loss, and isolation at the center frequency of 3 GHz for the designed ferrite circulator. The isolation reaches 30 dB at 3 GHz for magnetization of 1450 Oe. The average insertion loss is better than 1 dB for covered bandwidth (2.9 GHz – 3.1 GHz.). For higher magnetization (1600 Oe), the isolation is increased but the frequency is shifted. Looking this condition, the designed circulator

Из рис.4. видно, что намагничивание 1450 Оэ дает наилучший результат по обратным потерям, вносимым потерям и изоляции на центральной частоте 3 ГГц для проектируемого ферритового циркулятора. Изоляция достигает 30 дБ при 3 ГГц для намагничивания 1450 Оэ. Средний вносимые потери менее 1 дБ для полосы пропускания (2.9 ГГц – 3.1 ГГц.). Для более высокой намагниченности (1600 Оэ), изоляция увеличена но частота сдвигается. Видя эти результаты, разработанный циркулятор был оптимизирован, чтобы найти лучшее состояние на частоте 3 ГГц. В таблице III показано значение S-параметра при различной намагниченности для центральной частоты 3 ГГц.

the best condition at 3 GHz. Table III shows the S-parameter value at various magnetization for center frequency of 3 GHz.

TABLE III. S-PARAMETERS FOR DIFFERENT MAGNETIZATION OF STRIPLINE CIRCULATOR AT FREQUENCY 3 GHz

Magnetization (Oe)	Return Loss/S11 (dB)	Insertion Loss/S21 (dB)	Isolation /S31 (dB)
1000	-12.978	-1.377	-13.166
1200	-15.558	-0.814	-16.016
1350	-19.125	-0.561	-22.172
1520	-22.273	-0.474	-30.085
1600	-18.062	-0.517	-20.657

Fig.5. shows the comparison between the initial design structure to the final optimization of the ferrite circulator after another set of simulation. The increasing value of the radius ferrite and inner conductor resulting in the frequency shifted back to the center frequency of 3 GHz although the isolation has decreased. Table IV shows the final parameters and results from the optimized structure of stripline ferrite circulator for Frequency 3 GHz.

На рис.5. показано сравнение исходной расчетной структуры с окончательной оптимизацией ферритового циркулятора после другого набора моделирования. Увеличение значения радиуса феррита и внутреннего проводника приводит к тому, что частота смещается назад к центральной частоте 3 ГГц, хотя изоляция уменьшилась. В таблице IV приведены окончательные параметры и результаты оптимизации структуры полосового ферритового циркулятора для частоты 3 ГГц.

Fig.6. shows the electric field distribution of the ferrite circulator. It shows the all port can be used as input as the three ports have the same value for the return loss, insertion loss, and isolation symmetrically. These show the proper function of the circulator.

На рис.6. показано распределение электрического поля ферритового циркулятора. Он показывает, что все порты могут использоваться в качестве входных данных, поскольку три порта имеют одинаковое значение для обратной потери, вносимой потери и изоляции симметрично. Они показывают правильную функцию циркулятора.

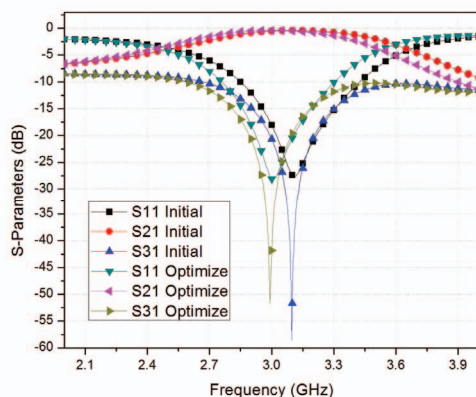


Fig. 5. Initial versus optimize of graphic S-Parameter model of the ferrite circulator for magnetization 1600 Oe.

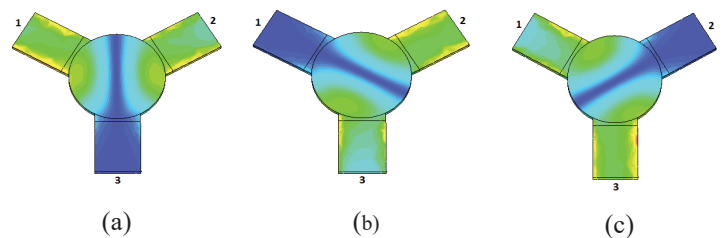


Fig. 6. Wave circulation. (a) Input from port 1, (b) Input from port 3, (c) Input from port 2.

TABLE IV. PARAMETERS AND RESULTS OF THE OPTIMIZED STRUCTURE OF FERRIT STRIPLINE CIRCULATOR FOR FREQUENCY 3 GHz

Property	Values
Radius Ferrite (R)	6 mm
Ferrite Disk Thickness (H)	2 mm
Width Conductor Lines (W)	5.67 mm
Length Conductor Lines (L)	7 mm
Return Loss (S11)	-28.111 dB
Insertion Loss (S21)	-0.411 dB
Isolation (S31)	-41.831 dB

IV. CONCLUSION

The design and simulation result shows good performance at the frequency of 3 GHz. According to the simulation, the differential magnetization is implemented for the circulator design for the optimized results. All these optimizes S-parameters covered bandwidth (2.9 GHz - 3.1 GHz) of the system, which is generally a good coverage for the radar system and with a good isolation result, the circulator design can be used for a single/shared system antenna or to protect another component.

ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by Ministry of research, Technology and Higher Education of the Republic of Indonesia (RISTEKDIKTI) under the scheme of the national innovation systems research incentives (Insinas) and supported by radar research on microwave components at the Research Center for Electronics and Telecommunication - Indonesian Institute of Sciences (PPET - LIPI).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат проектирования и моделирования показывает хорошую производительность на частоте 3 ГГц. В соответствии с моделированием, дифференциальное намагничивание реализовано для конструкции циркулятора для оптимизированных результатов. Все это оптимизирует s-параметры покрытой полосы пропускания (2,9 ГГц - 3,1 ГГц) системы, которая, как правило, является хорошим покрытием для радиолокационной системы и с хорошим результатом изоляции, конструкция циркулятора может использоваться для одной/общей антенны системы или для защиты другого компонента.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Эта работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства исследований, технологий и высшего образования Республики Индонезия (RISTEKDIKTI) в рамках программы национальных инновационных систем стимулирования научных исследований (Insinas) и при поддержке радиолокационных исследований микроволновых компонентов в Исследовательском центре электроники и телекоммуникаций - индонезийском Институте наук (PPET - LIPI).