Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396.677.7

DOI: 10.30748/nitps.2021.44.11

А.С. Дудуш, В.І. Мельник, М.А. Шевченко

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕН НА ОСНОВІ ФЕРИТОВИХ ФАЗООБЕРТАЧІВ НА ЕФЕКТІ ФАРАДЕЯ

Антенни на основі дискретних взаємних феритових фазообертачів на ефекті Фарадея широко застосовуються в якості елементів двовимірних плоских фазованих антенних решіток (ФАР) РЛС протиповітряної оборони. В статті проведено аналіз наукових публікацій та літератури, присвячених питанням конструювання даного типу випромінювачів. Узагальнено інформацію щодо розрахунку та вибору параметрів конструції даного типу антен. Приведено методику створення математичної моделі елементу пасивної ФАР на основі взаємного феритового фазообертача на ефекті Фарадея у системі автоматизованого проектування CST Studio Suite. Представлено результати моделювання основних параметрів даної антени у X-діапазоні.

Ключові слова: феритовий фазообертач, ефект Фарадея, математична модель, CST Studio Suite.

Вступ

Постановка проблеми. Ряд труднощів при розробці та перший досвід експлуатації активних фазованих антенних решіток (ФАР), перш за все в X- та Ka-діапазонах частот, вимагають зваженого і відповідального підходу при прийнятті рішення на користь використання пасивних або активних ФАР, виходячи насамперед з тактико-технічних завдань РЛС, що вирішуються за допомогою електронного сканування променем у просторі.

Крім цього, зі зменшенням довжини хвилі швидко росте вартість активних ФАР, що становить 70...90 % вартості всієї РЛС. Багатофункціональні РЛС з великими активними ФАР у зазначених діапазонах є досить дорогими (вартість 1 м² апертури антени може досягати сотень тисяч \$) [1].

Тому і сьогодні у світі не слабшає інтерес до розвитку і вдосконалення технологій побудови багатоканальних пасивних ФАР з антенними елементами на основі феритових фазообертачів (ФО). Окрім того, у відкритій літературі описані приклади можливого застосування даних ФО у перспективних мобільних РЛС з активними ФАР X-діапазону [2].

З часу створення перших ФАР для бортових і наземних мобільних комплексів еволюція таких ФО проходила в напрямку вдосконалення технології створення надвисокочастотних (НВЧ) феритових матеріалів, а також у широкому впровадженні новітніх досягнень мікроелектроніки у керувальних пристроях ФО. Зокрема сьогодні вже відомі розробки феритових ФО X-діапазону [3], до складу яких введено керований поляризатор, який поряд із забезпе-

ченням необхідних фазових зсувів дозволяє працювати ФАР вже на чотирьох поляризаціях: двох лінійних – вертикальній і горизонтальній, а також двох кругових – правій і лівій. Це дає РЛС на їх основі додаткові можливості з адаптивного захисту від перешкод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Такі вирішальні параметри як НВЧ-втрати, енергія, що затрачується на керування, вага, розміри та вартість були доведені до значень, які дозволили застосовувати феритові ФО для створення ФАР ще на початку 60-х років минулого століття [4]. Взаємні дискретні (з фіксацією положення) ФО є особливо перспективними тому, що потребують подачі керувальної напруги лише в моменти переміщення діаграми направленості (ДН) у нове положення або зміни її форми. Розроблені і створені на сьогоднішній день феритові ФО не лише відповідають вказаним вище вимогам, але й мають прийнятні температурні властивості, робочу смугу частот, пікові та середні значення пропускної НВЧ-потужності, час перемикачів та розміри поперечного перерізу [5].

Одним із основних типів взаємних феритових ФО, які знайшли практичне застосування у ФАР багатофункціональних РЛС, є взаємний феритовий ФО на ефекті Фарадея [6–9]. У ФО на ефекті Фарадея фазовий зсув отримується в результаті взаємодії електромагнітної хвилі (ЕМХ) з круговою поляризацією з поздовжньо намагніченим феритом, розміщеним у хвилеводному пристрої.

Застосування принципу напівнатурного моделювання для перевірки адекватності аналітичних співвідношень та справедливості припущень щодо

можливих помилок в процесі проектування суттєво обмежує можливості з доробки дослідного зразка у стиснуті терміни та з мінімальними затратами.

В сучасних умовах зазначені проблеми можуть бути вирішені із застосуванням систем автоматизованого проектування (САПР) пристроїв НВЧ, як наприклад CST Studio Suite [10].

Мета статті – узагальнення інформації з питань конструювання елементів ФАР на основі взаємних феритових фазообертачів на ефекті Фарадея та розробка методики створення математичної моделі даної антени у САПР CST Studio Suite.

Виклад основного матеріалу

Теорія побудови ФФО на ефекті Фарадея. Принцип роботи ФФО на ефекті Фарадея заснований на взаємодії ЕМХ кругової поляризації з повздовжньо намагніченим феритом, поміщеним у симетричний хвилевід квадратного або круглого перерізу [6]. Зміна амплітуди повздовжнього магнітного поля призводить до обертання поля ЕМХ кругової поляризації, що обумовлює фазовий зсув. Так як напрямок обертання поля ЕМХ залежить від орієнтації вектору електричного поля (напрямку поляризації), то фазовий зсув є невзаємним. Проте забезпечивши кругову поляризацію ЕМХ, що буде розповсюджуватися у керованому фериті в обох напрямках, можна отримати взаємний фазовий зсув. Останнє може досягатися двома способами:

1) використання одного поляризатора та випромінювання у простір і прийому ЕМХ кругової поляризації – така конструкція є типовою для великих пасивних ФАР з оптичною системою живлення [11];

2) використання двох поляризаторів на обох кінцях ФФО та випромінювання ЕМХ лінійної поляризації (рис. 1).

Рис. 1. Конструкція взаємного ФФО на ефекті Фарадея
Джерело: [6, С. 114].

Основним елементом конструкції є керований ферит, який забезпечує дискретний фазовий зсув ЕМХ. Два невзаємні поляризатори (ПР) утворюються феритовими секціями, що обертають поляризацію ЕМХ на 45° , та чотвертьхвильовими пластинами (ЧХП), які перетворюють поляризацію ЕМХ з лінійної (ЛП) на кругову (КП) та навпаки. Лінійні поля-

ризатори (ЛПР) з обох боків конструкції не пропускають на її входи ЕМХ, з поляризацією ортогональною до основної (у даному випадку, вертикальної).

Особливістю дискретних (з фіксацією положення) ФФО є те, що вони потребують подачі управляючої напруги лише в моменти переміщення діаграми направленості антени у нове положення або зміни її форми. Принцип управління ФФО полягає в наступному [7]. Постійна розповсюдження ЕМХ у поздовжньо намагніченому фериті пропорційна величині індукції магнітного поля, яка в свою чергу, згідно закону Фарадея, визначається добутком величини напруги U , прикладеної до обмоток управління, на тривалість імпульсу τ цієї напруги. Тому фазу коефіцієнта проходження можна змінювати шляхом подачі на обмотку управління імпульсів напруги визначеної тривалості

$$\Delta\varphi(\tau) = A \frac{U\tau}{wS}, \quad (1)$$

де A – постійний коефіцієнт пропорційності;

w – число витків обмотки;

S – площа поперечного перетину секції фазового зсуву.

Принциповою перевагою ФФО на ефекті Фарадея є те, що зсув фази (1) лише незначною мірою залежить від частоти і температури, що може бути легко скомпенсоване при використанні ступінчасто-го перемикачів градуированого намагнічувального потоку.

У випадку трьохрозрядного ФО для отримання набору фаз з дискретністю $\Delta\varphi = 45^\circ$ необхідно на обмотку набору фази подавати три імпульси різної тривалості, що забезпечать зміну фази на $45^\circ, 90^\circ$ і 180° .

Типове значення втрат НВЧ енергії при проходженні через ФФО на ефекті Фарадея становить 0,9 дБ, а значення пікової потужності – $3 \dots 5 \text{ кВт}$ [4]. Пікова потужність може бути збільшена, правда ціною зростання НВЧ втрат до 1,2 дБ, при використанні залізно-ітрієвого гранату, легованого певними рідкоземельними елементами [7].

Моделювання феритів (магнітних гіротропних матеріалів) у САПР CST Studio Suite. Застосування статичного магнітного поля до феритового матеріалу спричиняє прецесійний рух обертальних електронів, який можна описати залежним від частоти та анізотропним тензором магнітної проникності. Такі матеріали називаються магнітними гіротропними або просто гіромагнітними і описуються тензором електромагнітної проникності (тензором Полдера) [12], за припущення, що матеріал намагнічено до рівня насичення із використанням повздовжнього магнітного поля (у напрямку осі z):

$$\vec{\mu}(\omega) = \begin{bmatrix} \mu_1(\omega) & \mu_2(\omega) & 0 \\ -\mu_2(\omega) & \mu_1(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

з елементами

$$\mu_1(\omega) = \mu_0 + \frac{\omega_m(\omega_l + j\omega\alpha)}{(\omega_l + j\omega\alpha)^2 - \omega^2},$$

$$\mu_2(\omega) = \frac{j\omega\omega_m}{(\omega_l + j\omega\alpha)^2 - \omega^2},$$

де μ_0 – магнітна проникність вільного простору.

Частота Лармора при напруженість статичного поля зсуву всередині фериту H_0 :

$$\omega_l = \gamma\mu_0 |\vec{H}_0|$$

та гіротропна частота (частота підмагнічування)

$$\omega_m = \gamma 4\pi M_s$$

пов'язані з щільністю магнітного потоку та намагніченістю насичення шляхом використання гіромагнітного відношення

$$\gamma = \frac{ge}{2m_e}.$$

Дане відношення розраховується на основі множника Ланде g , що пов'язаний із зарядом e та масою m_e електрону.

Коефіцієнт затухання α , який був введений Л. Ландау та Є. Ліфшицем [13], описує процес згасання прецесійного руху. Цей коефіцієнт може бути визначений шляхом вимірювання ширини резонансної лінії ΔH для заданої опорної частоти ω_r , як

$$\alpha = \frac{\mu_0 \gamma \Delta H}{2\omega_r}. \quad (3)$$

Описана вище методика справедлива для задавання параметрів фериту у системі SI. У САПР CST Studio Suite також передбачена можливість використання системи Гауса. Тому у діалоговому вікні “Dispersive Material Parameters” (рис. 2) можна задати параметри матеріалу у двох зазначених системах.

Рис. 2. Діалогове вікно задавання параметрів гіротропного матеріалу
Джерело: довідкова система САПР CST Studio Suite.

Для задавання параметрів фериту у системі Гауса необхідно визначити: множник Ланде g ; ширину резонансної лінії ΔH та намагніченість насичення M_s . Для зручності у діалоговому вікні вводиться величина $4\pi M_s$, оскільки саме це значення зазвичай вказується виробниками феритів. Опорна частота ω_r , необхідна для визначення коефіцієнту α (3), і вектор магнітного поля визначатимуть амплітуду і напрямок поля зсуву всередині фериту для однорідного поля і можуть бути задані для кожного матеріалу окремо. Це відповідає напруженості статичного

поля H_0 , як зазначено вище, яка має бути визначена в ерстедах.

Ввівши параметри матеріалу в системі SI можна визначити коефіцієнт α , частоту Лармора, гіротропну частоту та напрямок прикладання поля, що підмагнічує.

Перемикання між системами одиниць обумовлює автоматичний перерахунок всіх записаних параметрів. Модель перетворення параметрів із системи Гауса в систему SI показана на рис. 2. Параметри фериту, які задаються в системі Гауса, позначені зірочкою.

При переході від системи SI до системи Гауса ко-множник Ланде дорівнює 2 (що є характерним для більшості феритів). Загальні співвідношення між двома системами одиниць задаються як:

$$1 \text{ ерстед } [e] = \frac{1000}{4\pi} \frac{A}{m}, \quad 1 \text{ Гаус } [Gc] = 10^{-4} \text{ Тесла } [T].$$

Частково намагнічені ферити. НВЧ ФФО, як правило, працюють у стані часткової намагніченості [4]. При низькому рівні намагніченості відносна магнітна проникність фериту може суттєво відрізнятися від початкової. Для моделювання поведінки структур, що містять частково намагнічені ферити, у САПР CST Studio Suite використовується модель розрахунку тензору електромагнітної проникності відповідно до прикладеного магнітного поля зміщення, запропонована Дж. Гріном та Ф. Сенді [14]. Для активації даної моделі при використанні солверу в частотній області запускається макрос “Partially Saturated Ferrites”. В іншому випадку параметри фериту будуть обчислюватися із застосуванням тензору Полдера (2) для магнітних гіротропних матеріалів, які знаходяться у стані повного насичення.

Для випадку частково намагніченого фериту тензор електромагнітної проникності має вид

$$\vec{\mu}(\omega) = \begin{pmatrix} \mu_1(\omega) & \mu_2(\omega) & 0 \\ -\mu_2(\omega) & \mu_1(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3(\omega) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

елементи якого, визначені Дж. Гріном та Ф. Сенді, розраховуються як

$$\mu_1(\omega) = \mu_\infty \mu_s + (1 - \mu_s) \left(\frac{M}{M_s} \right)^{\frac{3}{2}};$$

$$\mu_2(\omega) = -i \frac{\gamma 4\pi M}{\omega};$$

$$\mu_3(\omega) = \mu_s \left(1 - \frac{M}{M_s} \right)^{\frac{5}{2}}$$

з проникністю, розрахованою Е. Шльоманом [15]:

$$\mu_s = \frac{2}{3} \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma 4\pi M_s}{\omega} \right)} + \frac{1}{3}.$$

Коли використовується однорідне магнітне поле зсуву, оцінюється локальне намагнічування. У такому випадку, оскільки ефект фериту не враховується у феритовому матеріалі, функція “Partially magnetized ferrite material” відтворюється всередині ефекту намагнічування, що дозволяє обчислити елементи тензору (4) як функції від співвідношення M/M_s . Розрахунок намагніченості базується на наближенні синуса між величиною зміщення магнітного поля H_0 і намагніченістю насичення $4\pi M_s$, що вводиться як характеристика матеріалу. Тоді вираз для розрахунку коефіцієнту M/M_s приймає вигляд

$$\frac{M}{M_s} = \sin \left(\mu_0 \frac{H_0}{M_0} \right)$$

і описує модель поведінки більшості існуючих феритових матеріалів у НВЧ області, але не є таким точним, як експериментально отримані результати характеристик реального феритового матеріалу B/H .

Поляризація мод EMX у фериті. При розповсюдженні у фериті відбувається виродження моди EMX, тому дві моди зі спільною константою поширення можуть бути лінійно поєднані. Існує два варіанти визначення поляризації вироджених мод залежно від типу сітки, що використовується для розбиття структури моделі.

Для випадку тетрагедральної сітки, поляризацію для вироджених типів EMX можна визначити за допомогою діалогового вікна “Імпеданс та калібрування мод” (рис. 3). Для цього потрібно задати дві поляризаційні лінії, що визначають орієнтацію векторів електричного поля двох вироджених мод, перпендикулярних один одному.

Рис. 3. Вікно “Імпеданс та калібрування мод”
Джерело: довідкова система САПР CST Studio Suite.

При натисканні кнопки “Додати” відкривається діалогове вікно “Лінія імпедансу та калібрування” (рис. 4), де визначаються параметри кожного рядка таблиці рис. 3. У даному вікні можуть бути визначені кількість мод, порядковий номер поляризаційної лінії та обрано режим створення ліній.

Рис. 4. Вікно “Лінія імпедансу та калібрування”
Джерело: довідкова система САПР CST Studio Suite.

Для створення порту, який буде моделювати систему живлення діелектричного хвильоводу, використаємо джерело “Порт хвильоводу”. Для цього за допомогою інструменту “Вибір” необхідно виділити місце зрізу діелектрика та активувати “Порт хвильоводу” (рис. 5, а), а потім задати потрібну кількість мод та їх поляризацію (рис. 5, б).

Рис. 5. Порт хвильоводу (а) та лінії калібрування (б) для двох мод ЕМХ типу TE_{11} з ортогональною ЛПР
Джерело: довідкова система САПР CST Studio Suite.

Моделювання характеристик антени на основі ФФО на ефекті Фарадея. Для створення структури моделі (рис. 6) була використана запропонована в [7] конструкція антени та наступні характеристики її основних елементів: діелектричні випромінювачі та хвильоводи – $\epsilon = 7,2$; узгоджувальні діелектричні шайби – $\epsilon = 10$; НВЧ-ферит [16] – $\epsilon = 15$, $4\pi M_s = 1\,300\text{ Гс}$.

Діаметр та довжина феритового стрижня були обрані $0,25\lambda$ та $1,94\lambda$ відповідно.

Розрахунки проводилися з використанням обчислювача в частотній області на основі методу кінцевого інтегрування.

Рис. 6. Структура моделі антени на основі ФФО на ефекті Фарадея
Джерело: розроблено авторами за даними [7, С. 64].

За результатами розрахунку S -параметрів антени у діапазоні частот $9,8 \dots 10,2$ ГГц отримано залежність зворотних втрат S_{11} (рис. 7). Для отриманої моделі центральна частота становить $f_0 = 9,9\text{ ГГц}$, а ширина смуги пропускання при $S_{11} = -20\text{ дБ}$ (коefficient стоячої хвилі за напругою $1,07$) становить 54 МГц ($< 1\%$).

Рис. 7. Зворотні втрати антени в X -діапазоні
Джерело: розроблено авторами.

Графіки ДН антени на основі ФФО на ефекті Фарадея для центральної частоти $f_0 = 9,94\text{ ГГц}$ у

горизонтальній ($\varphi = 0^\circ$) та вертикальній ($\varphi = 90^\circ$) площині представлені на рис. 8.

Рис. 8. Перерізи ДН антени при $f_0 = 9,9\text{ ГГц}$:

а – $\varphi = 0^\circ$; б – $\varphi = 90^\circ$

Джерело: розроблено авторами.

Згідно результатів моделювання, ширина ДН становить $\Delta\theta_{\varphi=0^\circ} = 78,7^\circ$ та $\Delta\theta_{\varphi=90^\circ} = 76,6^\circ$, а рівень бічних пелюсток $РБП_{\varphi=0^\circ} = -9,6 \text{ дБ}$ та $РБП_{\varphi=90^\circ} = -9,3 \text{ дБ}$ відповідно у площині $\varphi = 0^\circ$ та $\varphi = 90^\circ$.

Коефіцієнт направленої дії антени становить $D = 7,83 \text{ дБ}$, а коефіцієнт підсилення $G = 6,41 \text{ дБ}$, що вказує на НВЧ втрати порядку 1,4 дБ.

Висновки

За результатами проведеного аналізу узагальнено та систематизовано дані, необхідні для конс-

труювання антен на основі феритового фазообертача на ефекті Фарадея. Запропонована методика створення структури зазначеної антени у САПР CST Studio Suite, яка містить наступні кроки: задавання параметрів гіротропного матеріалу; визначення параметрів частково намагніченого фериту; задавання поляризації мод ЕМХ типу TE_{11} у фериті; розрахунок основних параметрів антени. Результати моделювання основних параметрів антени корелюються з відомими результатами теоретичних та практичних досліджень, що свідчить про адекватність моделі. Це, в свою чергу, дозволяє розглядати розроблену структуру як інструмент для проведення подальших теоретичних досліджень антен на основі ФФО на ефекті Фарадея.

Список літератури

1. Толкачев А. А., Егоров Е. Н., Шишлов А. В. Некоторые тенденции развития радиолокационных и связных систем. *Радиотехника*. 2006. № 4. С. 5-11.
2. Друзин С. В., Горевич Б. Н. Методика формирования облика радиолокационных станций перспективной системы вооружения войсковой ПВО. *Вестник концерна ВКО "Алмаз-Антей"*. 2020. № 2. С. 6-31. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-2-6-31>.
3. Черников Д. Новые ферритовые СВЧ-устройства для перспективных фазированных антенных решеток: *Воздушно-космическая сфера*. 2017. № 3(92). С. 64-71.
4. Hord W., Boyd C., Rosenbaum F. Application of reciprocal latching ferrite phase shifters to lightweight electronic scanned phased arrays. *Proceedings of the IEEE*. 1968. Vol. 56. No. 11. P. 1931-1939. <https://doi.org/10.1109/PROC.1968.6768>.
5. Синани А. И., Кауфман Г. В. Антенны и радары с электронным управлением лучом. Москва : Радиотехника, 2016. 234 с.
6. Hord W., Rosenbaum F., Benet J. Theory and Operation of a Reciprocal Faraday-Rotation Phase Shifter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1972. Vol. 20. No. 2. P. 112-119. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1972.1127693>.
7. Корниенко Л. Г. Построение и эксплуатация антенных систем радиотехнического вооружения зенитных ракетных комплексов. Ч. 2. Харьков : ВИРТА ПВО, 1978. 99 с.
8. 60 лет НПО "Алмаз". Победы и перспективы / Под ред. А.А. Леманского. Москва : ИФ "Унисерв", 2007. 559 с.
9. Винниченко Ю. П., Сафонов А. П., Секистов А. Н., Семенов А. А., Туманская А. Е. Широкополосный волновоодно-стержневый элемент фазированной антенной решетки X-диапазона. *Антенны*. 2008. № 5. С. 44-48.
10. Electromagnetic systems modeling. CST studio suite. *3DEXPERIENCE Company* : веб-сайт. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/electromagnetic-systems/> (дата звернення: 01.02.2021).
11. Barton K. The 1993 Moscow Air Show (special report). *Microwave Journal*. May 1994. P. 24-39.
12. Polder D. On the theory of ferromagnetic resonance. *Physica*. 1949. Vol. 5. No. 1-2. P. 253-255. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(49\)90051-8](https://doi.org/10.1016/0031-8914(49)90051-8).
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел. *Физический журнал СССР*. 1935. Т. 8. С. 153-169.
14. Green J., Sandy F. Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974. Vol. 22. No. 6. P. 641-645. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1974.1128306>.
15. Schlömann E. Microwave Behavior of Partially Magnetized Ferrites. *Journal of Applied Physics*. 1970. Vol. 41. No. 1. P. 204-214. <https://doi.org/10.1063/1.1658322>.
16. Каталог ферритов. АО "Конструкторское бюро-1" : веб-сайт. URL: <https://www.oaokb1.ru/deyatelnost/ferrit-proizvodstvo/katalog/> (дата звернення: 30.03.2021).

Надійшла до редколегії 21.05.2021

Схвалена до друку 13.07.2021

Відомості про авторів:

Дудуш Анатолій Сергійович

кандидат технічних наук
старший викладач Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8454-2127>

Information about the authors:

Anatoly Dudush

Candidate of Technical Sciences
Senior Instructor of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8454-2127>

Мельник Владислав Ігорович

курсант

Харківського національного

університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,

Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-5303-2899>

Vladislav Melnik

Cadet

of Ivan Kozhedub Kharkiv National

Air Force University,

Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-5303-2899>

Шевченко Максим Анатолійович

курсант

Харківського національного

університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,

Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-9195-3354>

Maksym Shevchenko

Cadet

of Ivan Kozhedub Kharkiv National

Air Force University,

Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-9195-3354>

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ФЕРРИТОВЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТЕ ФАРАДЕЯ

А.С. Дудуш, В.И. Мельник, М.А. Шевченко

Антенны на основе дискретных взаимных ферритовых фазовращателей на эффекте Фарадея широко применяются в качестве элементов двумерных плоских фазированных антенных решеток (ФАР) РЛС противовоздушной обороны. В статье проведен анализ научных публикаций и литературы, посвященных вопросам конструирования данного типа излучателей. Обобщена информация по расчету и выбору параметров конструкции данного типа антенн. Приведена методика создания математической модели элемента пассивной ФАР на основе взаимного ферритового фазовращателя на эффекте Фарадея в системе автоматизированного проектирования CST Studio Suite. Представлены результаты моделирования основных параметров данной антенны в X-диапазоне.

Ключевые слова: ферритовый фазовращатель, эффект Фарадея, математическая модель, CST Studio Suite.

MODELLING OF FARADAY-ROTATION PHASE SHIFTER ANTENNAS

A. Dudush, V. Melnik, M. Shevchenko

Faraday-rotation phase shifter antennas are widely used as elements of two-dimensional flat phased arrays of air defense radars. The Faraday-rotation phase shifters are especially useful since drive energy is supplied only when the beam is steered to a new pointing direction or its shape is changed. In the article scientific publications and literature devoted to the design of this type of antennas were analyzed. The information on the calculation and design parameters selection for this type of antennas was generalized. The Faraday-rotation phase shifter uses the interaction between a circularly polarized wave and a longitudinally magnetized ferrite in a symmetrical waveguide. To create a structure of ferrite, the gyrotropic material model based on the results of studies of the Kharkiv scientists L. Landau and E. Lifshitz was used. A methodology is given to the creation of a mathematical model of the reciprocal Faraday-rotation phase shifter antenna for passive phased array in the CST Studio Suite CAD system. The methodology consists of the next steps: setting the parameters of gyrotropic material; determine the parameters of partially magnetized ferrite material; define the polarization of degenerated TE_{11} modes; calculate the main parameters of the antenna (return losses, bandwidth, directivity, gain, HF-losses, pattern). Using the proposed methodology the structure of the Faraday-rotation phase shifter antenna model for passive phased array was created. To create the structure, the design of the antenna described by L. Kornienko was used. The simulation results of the main parameters of the antenna in the X-band are presented. Calculations were carried out using a frequency domain solver based on the finite integration technique. Obtained results are correlated with the well-known results of theoretical and practical research.

Keywords: ferrite phase shifter, Faraday effect, mathematical model, CST Studio Suite.