

УДК 621.375.4:004.942

АНТЕННЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ МОНОСТАТИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ УВЧ RFID СЧИТЫВАТЕЛЯ С ВЫСОКОЙ РАЗВЯЗКОЙ ТРАКТОВ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ

Вей Пхью У, магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кирильчук В. Б., - кандидат технических наук, доцент

Аннотация. Работа посвящена разработке антенного модуля считывателя UHF RFID, в котором используется метод компенсации пассивного резонатора в сочетании с ортогональной круговой поляризацией (RHCP/LHCP) для достижения высокой изоляции (>30 дБ) между трактами передачи (Tx) и приема (Rx). Основное внимание уделяется оптимизации пассивного компенсирующего резонатора, который в сочетании с поляризационным сепаратором значительно снижает взаимные помехи в диапазоне 865-868 МГц.

Ключевые слова. RFID-считыватель, UHF антенна, компенсация пассивного резонатора, круговая поляризация, изоляция Tx/Rx, антенно-фидерный модуль, подавление помех.

Введение

Технология радиочастотной идентификации (RFID) UHF-диапазона, играющая ключевую роль в современных системах беспроводной связи, сталкивается с критической проблемой обеспечения достаточной изоляции между трактами передачи (Tx) и приема (Rx), где традиционные методы (циркуляторы, пространственное разделение) обеспечивают ограниченную изоляцию (20-30 дБ) и имеют существенные недостатки [2,5,8]. В данной работе предлагается инновационное решение, основанное на компенсации пассивного резонатора - алюминиевой пластине размером 100.6×100.6 мм² с регулируемым положением (34.5±0.1 мм), которая в сочетании с двухмодовым резонатором (С-образные щели) и поляризационным сепаратором на подложке Flap-2.8 ($\epsilon_r=2.8$) позволяет достичь изоляции >30 дБ при KCBH <1.5 и осевом отношении <3 дБ в диапазоне 865-868 МГц. Численное моделирование в CST Microwave Studio и AWR Microwave Office подтвердило, что предложенная архитектура с компенсирующим резонатором не только устраняет ограничения традиционных методов, но и обеспечивает стабильность характеристик при производственных допусках, сохраняя компактные габариты (182×182×39 мм³) и соответствие промышленным стандартам RFID, что делает её перспективным решением для современных помехоустойчивых RFID-систем [5,6,7].

Характеристики поляризации

Предлагаемая конструкция использует ортогональную круговую поляризацию (RHCP/LHCP) для достижения изоляции Tx/Rx, используя присущую развязку между противоположными состояниями поляризации. Как показано на рисунке 1, этот подход в основном опирается на выполнение двух критических условий, выведенных из электромагнитной теории [1]:

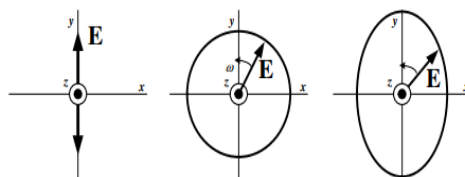


Рис.1 Схема распространения поляризованной волны

1. Ортогональные моды равной амплитуды:

$$E_x = E_y \quad (1)$$

где E_x and E_y представляют собой компоненты электрического поля в двух ортогональных плоскостях.

2. Точная разность фаз 90°:

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm(90^\circ + 360^\circ n), n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

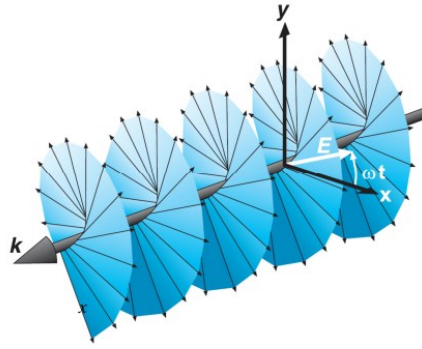


Рис. 2: Визуализация вращения поля RHCP/LHCP

Как показано на рисунке 2, эти условия создают либо правую круговую поляризацию (RHCP, $+90^\circ$), либо левую круговую поляризацию (LHCP, -90°), где вектор электрического поля вращается по круговой схеме, если смотреть в направлении распространения. Качество круговой поляризации количественно определяется осевым отношением (AR) [4]:

$$AR = \frac{|E_{major}|}{|E_{minor}|} < 3dB \quad (3)$$

где $AR \leq 3$ дБ требуется для практической работы CP (Круговая поляризация). В нашей реализации это достигается путем тщательного проектирования геометрии патч-антенны и сети питания, что обеспечивает правильное возбуждение ортогональных мод с требуемым фазовым соотношением. Чистота поляризации дополнительно повышается за счет структуры с подложкой из полости, которая минимизирует нежелательные компоненты кросс-поляризации, которые могут ухудшить характеристики изоляции.

Моностатическая конфигурация с изоляцией на основе поляризации

Моностатическая конфигурация предлагает компактную альтернативу бистатическим конструкциям, используя одну антенну как для передачи, так и для приема, что обеспечивается за счет поляризационной изоляции. Этот подход использует квадратурный 3-дБ гибридный ответвитель (рисунок 3) для достижения ортогональных круговых состояний поляризации — правосторонней круговой поляризации (RHCP) для передачи и левосторонней круговой поляризации (LHCP) для приема.

Гибридный ответвитель работает, разделяя передаваемый сигнал на два компонента одинаковой амплитуды с разностью фаз 90° :

$$V_{out1} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}} \text{ и } V_{out2} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}} e^{-j90^\circ} \quad (4)$$

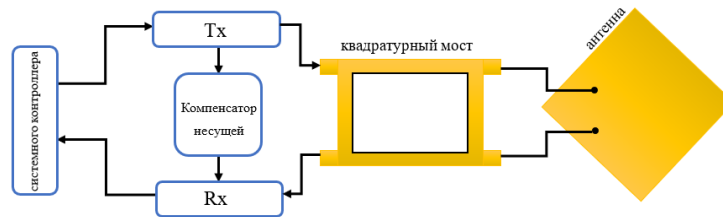


Рис.3. Направленный ответвитель, изолирующий Rx от Tx в ультравысокочастотных RFID-считывателях с подавителем утечки несущей

При подключении к двухполяризованной патч-антенне эти выходы генерируют идеальное излучение RHCP. Наоборот, входящие сигналы LHCP от RFID-меток объединяются в фазе на порту приема, при этом отменяя на порте передачи, обеспечивая внутреннюю изоляцию. Рисунок 3 иллюстрирует эту реализацию, показывая:

1. Топология микрополоскового гибридного соединителя
2. Ортогональные точки питания на патч-антенне
3. Механизм изоляции посредством ортогональности поляризации

Производительность изоляции системы можно количественно оценить с помощью

$$Isolation(dB) = 20\log\left(\frac{S_{21}}{S_{31}}\right) \quad (5)$$

где S_{21} представляет собой путь Tx-антенна, а S_{31} - утечку Tx-Rx. Эта конфигурация формирует основу для усовершенствованных методов изоляции, разработанных в этой работе, которые объединяют этот подход поляризации с методами пассивного резонатора для достижения изоляции >30 дБ.

Метод компенсации пассивного резонатора

В разработанной системе применён инновационный метод пассивной компенсации помех, основанный на использовании регулируемого резонатора. Как показано на рисунке 4, устройство представляет собой алюминиевую резонатор размером 100.6×100.6 мм² с прецизионным механизмом винтовой регулировки (± 0.1 мм), расположенную параллельно линии питания антенны. Принцип работы основан на создании контролируемого рассогласования импеданса: при прохождении сигнала утечки Tx через параллельный путь, реактивные L/C-компоненты резонатора генерируют компенсирующий сигнал с противоположной фазой, обеспечивая подавление помех на уровне 15-20 дБ в рабочем диапазоне 865-868 МГц.

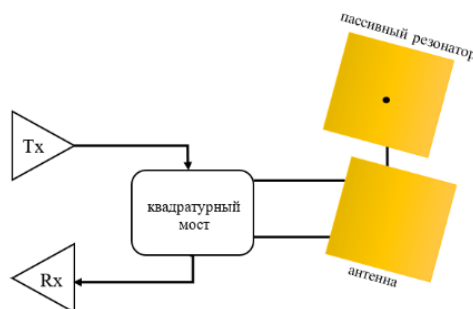


Рис.4 Вспомогательные методы работы пассивной резонаторной RFID-системы

Полученный сигнал в пассивной системе RFID разлагается на AC (статическую) и DC (динамическую) составляющие с использованием I/Q-демодуляции [3]:

$$I(t) = I_{DC} + I_{AC}(t), \quad Q(t) = Q_{DC} + Q_{AC}(t) \quad (6)$$

I_{DC}, Q_{DC} : Нежелательные статические сигналы (например, утечка считывателя, помехи окружающей среды).

I_{AC}, Q_{AC} : Динамические сигналы обратного рассеяния, несущие вызванные дефектами изменения амплитуды и фазы.

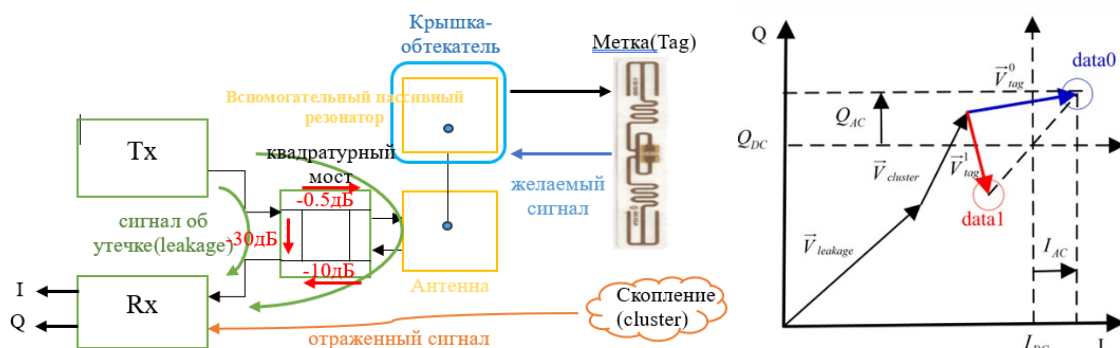


Рис.5. (а) Проблемы измерения пассивной системы датчиков RFID и (б) когерентная демодуляция.

Рисунок 5(а) подчеркивает ключевые проблемы измерения, такие как собственные помехи и шум, которые искажают сигналы RFID. Рисунок 5(б) иллюстрирует процесс когерентной демодуляции, где:

Считыватель отфильтровывает компоненты DC, чтобы выделить полезный сигнал AC (I_{AC}, Q_{AC}). Оставшийся сигнал AC обрабатывается для извлечения амплитуды (ΔP) и фазы (ϕ), что позволяет обнаруживать трещины.

Этот метод минимизирует нелинейные искажения, сохраняя при этом чувствительность к структурным дефектам.

Реализация и производительность антенно-фидерного модуля

Антенно-фидерный модуль представляет собой физическую реализацию предлагаемой конструкции считывателя UHF RFID, тщательно спроектированную для достижения оптимальной производительности в диапазоне частот 865–868 МГц. Как показано на рисунке 6, архитектура модуля объединяет три тщательно подобранных компонента в единую систему: излучающий двухмодовый резонатор, сеть поляризационного разделения и вспомогательный пассивный резонатор. Этот комплексный подход обеспечивает исключительную производительность при сохранении компактных размеров $182 \times 182 \times 39$ мм³, что делает его пригодным для промышленных приложений с ограниченным пространством.

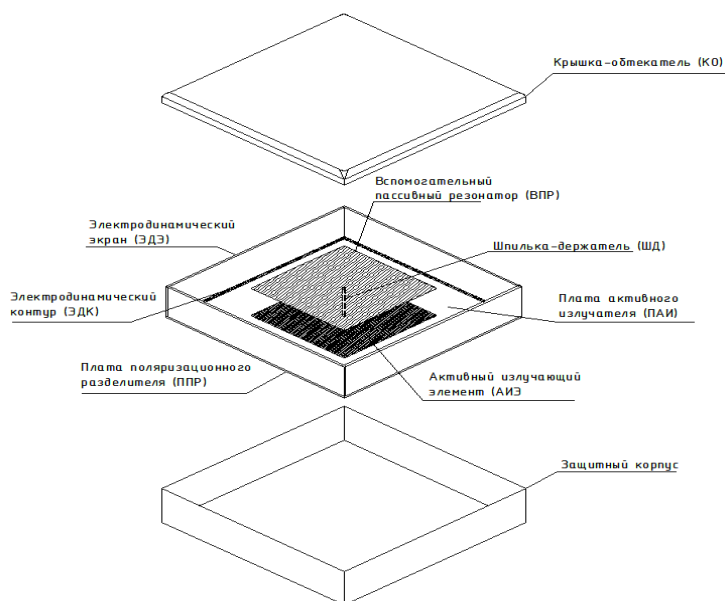


Рисунок 6. Эскиз конструкции антенно-фидерного модуля.

Центральным элементом конструкции является излучающий элемент, выполненный в виде квадратной патч-антенны с точно рассчитанными размерами $100,6 \times 100,6 \text{ мм}^2$. Антенна изготовлена на фторопластовой подложке (Flan-2.8), выбранной за ее стабильные диэлектрические свойства ($\epsilon_r = 2,8$) и минимальные характеристики потерь. Точки питания стратегически расположены на расстоянии 14,9 мм от краев патча, чтобы обеспечить надлежащее согласование импеданса, в то время как окружающая проводящая рамка (шириной 3 мм) функционирует как эффективный электромагнитный экран. Эта конфигурация размещена в квадратной волноводной полости высотой 35 мм, которая улучшает направленные диаграммы излучения и уменьшает нежелательные эффекты поверхностной волны.

На рисунке 7 подробно представлена реализация поляризационного сепаратора в качестве квадратурного гибридного ответвителя, критического компонента, который обеспечивает моностатическую работу системы. Ответвитель реализован с использованием симметричной микрополосковой конструкции, изготовленной на том же материале подложки Flan-2.8. Его топология отличается тщательно рассчитанной шириной дорожек и зазорами связи для достижения требуемого деления мощности 3 дБ с точной разницей фаз 90° между выходными портами. Компактная площадь ответвителя $100 \times 100 \text{ мм}^2$ позволяет бесшовную интеграцию под излучающей накладкой, при этом его выходные порты выровнены с точками возбуждения накладки через точно расположенные медные межсоединения (диаметр 1 мм, длина 4,5 мм).

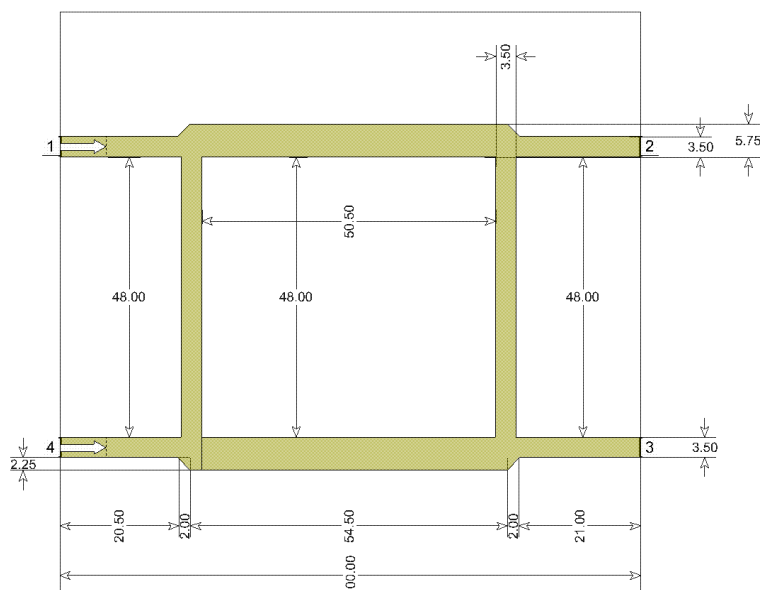


Рисунок 7. Эскиз топологии рисунка внутренней поверхности первой полуплаты поляризационного разделителя.

Вспомогательный пассивный резонатор вносит дополнительную степень оптимизации производительности за счет своей настраиваемой возможности подавления помех. Эта алюминиевая

пластина $100,6 \times 100,6 \text{ мм}^2$ устанавливается параллельно излучающей накладке на регулируемой высоте 34,5 мм, поддерживаемой резьбовым монтажным механизмом. Положение резонатора можно точно настроить для компенсации производственных допусков и факторов окружающей среды, гарантируя постоянную производительность во всех рабочих условиях. В сочетании с сетью поляризационного разделения эта подсистема обеспечивает надежную изоляцию между трактами передачи и приема.

Результаты и анализ производительности

Численное моделирование и процесс оптимизации дали превосходные эксплуатационные характеристики для антенно-фидерного модуля (АФМ), что продемонстрировано полным набором результатов моделирования. Производительность поляризационного сепаратора наглядно показана на рисунке 8, где S-параметры (слева) показывают постоянное разделение мощности на 3 дБ с минимальными вносимыми потерями ($<0,5 \text{ дБ}$), в то время как фазовые характеристики (справа) подтверждают, что критическая разность фаз 90° поддерживается в пределах $\pm 5^\circ$ по всему рабочему диапазону. Эти результаты подтверждают способность конструкции генерировать высококачественную круговую поляризацию.

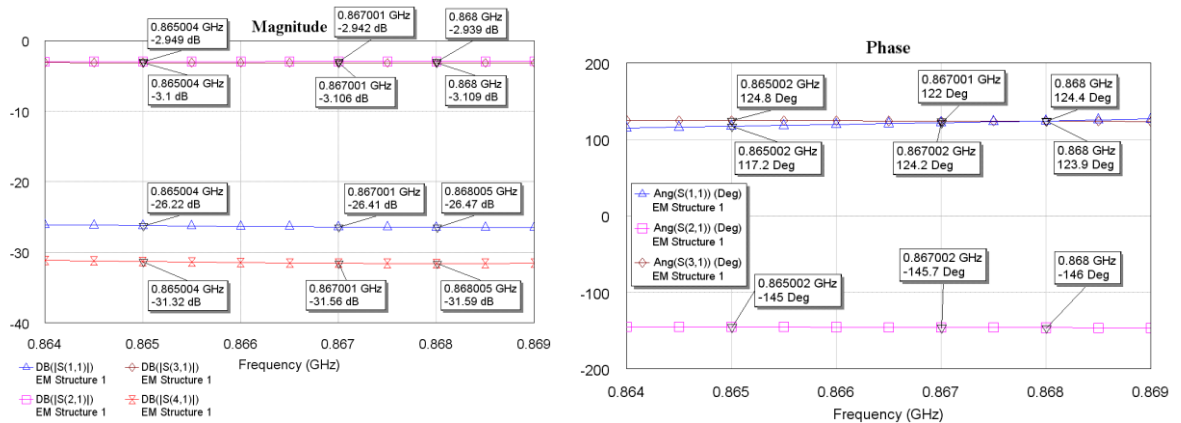


Рисунок 8. Частотная зависимость модуля и фазы S-параметров оптимизированной модели поляризационного разделителя.

Оптимизированный излучающий элемент с пассивной настройкой демонстрирует выдающееся соответствие импедансу на рисунке 9, где график Смита (слева) показывает стабильное поведение импеданса, а кривые КСВН (справа) остаются ниже 1,5 для всех портов в диапазоне 865-868 МГц.

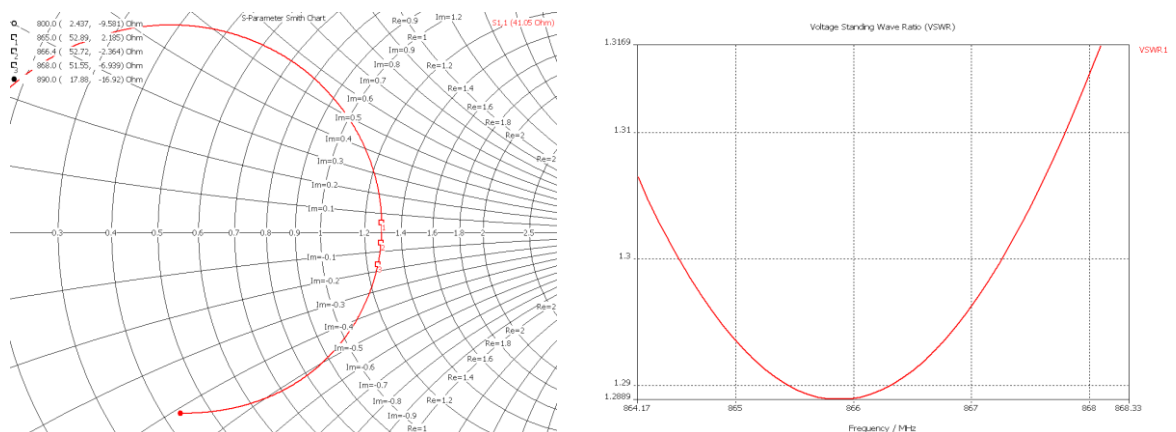


Рисунок 9. Частотные зависимости входного импеданса и КСВН для модели оптимизированного ИДМР с вспомогательным пассивным резонатором и крышкой-обтекателем по каждому из портов возбуждения.

Результаты моделирования частотной зависимости развязки между портами модели излучающего двухмодового резонатора с вспомогательным пассивным резонатором и крышкой-обтекателем приведены на рисунке 10. Исключительная изоляция между портами, превышающая 30 дБ, убедительно продемонстрирована на рисунке 10, где параметр S_{21} остается ниже -30 дБ во всем диапазоне частот.

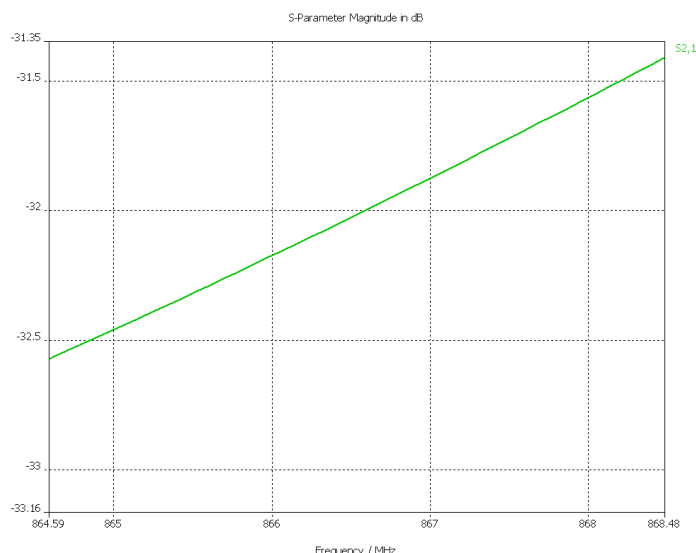


Рис.10. Частотная зависимость развязки между портами модели излучающего двухмодового резонатора с вспомогательным пассивным резонатором и крышкой-обтекателем.

Заключение

В заключение следует отметить, что в ходе данного исследования был успешно разработан оптимизированный антенно-фидерный модуль для считывателей UHF RFID, который обеспечивает исключительную производительность за счет инновационного управления поляризацией и пассивных резонаторных технологий, демонстрируя изоляцию Tx/Rx >30 дБ, KCB <1,5, осевое отношение <3 дБ и усиление 7 дБ в компактном корпусе размером 182×182×39 мм³, а также комплексное моделирование, подтверждающее готовность конструкции к внедрению в передовые системы RFID, а также предлагающее потенциальные приложения в других беспроводных технологиях, требующих высокой изоляции между близко расположенными антеннами.

Список использованных источников:

1. Баланис К.А. (Balanis C.A.) *Antenna Theory: Analysis and Design* // 4th ed., Wiley. 2016.
2. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, «Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications», *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, 4th Quart., 2015.
3. Passive RFID sensor systems for crack detection & characterization Jun Zhang, Gui Yun Tian, Ao Bo Zhao.
4. Abubakar Sharif, Jun Ouyang, Kamran Arshad, Muhammad Ali Imran, and Qammer H. Abbasi. *Passive UHF RFID Tag Antennas-Based Sensing for Internet of Things Paradigm Backscattering and RF Sensing for Future Wireless Communication*, First Edition. Edited by Qammer H. Abbasi, Hasan T. Abbas, Akram Alomainy, and Muhammad Ali Imran. 2021 John Wiley & Sons Ltd. Published 2021 by John Wiley & Sons Ltd. pp.133-155.
5. Попов А.А., Кирильчук В.Б. «Влияние поляризации на уровень интерференционных замираний в многолучевом канале связи» Третий Международный Радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». (МРФ-2008). Том 2. Конференция «Телекоммуникационные системы и технологии» (ТСТ-2008), секция 2 - «Телекоммуникационные системы и их элементы» 22-24 октября 2008г., г. Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, с. 231.
6. Способ и устройства для уменьшения интерференционных замираний сигналов при распространении радиоволн в многолучевом канале связи /Кирильчук В.Б., Лихачевский Д.В., Попов А.А., Чернуха Б.Н. Патент № 14992 от 14.03.2008 зарегистрирован в Гос. реестре изобретений 13.07.2011.
7. Способ повышения помехозащищенности RFID систем УВЧ-диапазона и устройство для его реализации. Евразийский патент №032987 от 30.08 2019г. (авторы Кирильчук В.Б., Кижлай И.Н., Парфенович Т.Н., Попов А.А.)
8. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. *Микрополосковые антенны* // М.: Радио и связь. 1986.

ANTENNA MODULE FOR MONOSTATIC CONFIGURATION OF UHF RFID READER WITH HIGH ISOLATION OF RECEIVE AND TRANSMIT PATHS

Wai Phyoo Oo, Master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Minsk, Republic of Belarus

Kirilchuk V.B., Associate Professor of the Department of IRT, Candidate of Technical Sciences.

Annotation. The work focuses on the development of a UHF RFID reader antenna module, which uses the passive reflector compensation method in combination with orthogonal circular polarization (RHCP/LHCP) to achieve high isolation (>30 dB) between the transmit (Tx) and receive (Rx) paths. The focus is on optimizing the passive compensating reflector, which, in combination with a polarizing separator, significantly reduces mutual interference (SI) in the range 865-868 Mhz.

Keywords. RFID Reader, UHF Antenna, Passive Reflector Compensation, Circular Polarization, Tx/Rx Isolation, Antenna Feeder Module, Interference Suppression.