

УДК 621.391

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПАССИВНОЙ СЕНСОРНОЙ RFID СИСТЕМЫ

Ю.Р. ПОБУДЕЙ, И.Д. МАРТЫНЕНКО, В.Б. КИРИЛЬЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)*

E-mail: imartynenko082@gmail.com

Аннотация. Приводится методика использования линейной поляризации передатчика считывателя и симметричных каналов антенны с круговой поляризацией сенсорной платформы RFID для повышения помехоустойчивости системы в замкнутом пространстве.

Abstract. A technique is presented for using linear polarization of the reader's transmitter and symmetrical antenna channels with circular polarization of the RFID sensor platform to increase the noise immunity of the system in an enclosed space.

Введение

Современное развитие систем беспроводной идентификации и дистанционного мониторинга обусловлено возрастающей потребностью в создании энергоэффективных и малогабаритных сенсорных устройств, способных функционировать без автономных источников питания. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области являются беспроводные идентификационно-сенсорные платформы, построенные на базе технологии RFID (Radio Frequency Identification). Использование пассивных RFID-систем позволяет реализовать удалённый контроль параметров окружающей среды при минимальном энергопотреблении и сравнительно низкой стоимости оборудования. Особый интерес представляют пассивные сенсорные RFID-платформы УВЧ-диапазона, применяемые для измерения температуры, влажности, механических деформаций и других физических параметров. Однако практическое применение подобных систем в реальных условиях эксплуатации сопровождается рядом проблем, связанных с влиянием многолучевого распространения радиоволн, переотражений от окружающих объектов и поляризационного рассогласования антенн. Указанные факторы приводят к возникновению интерференционных искажений и снижению помехоустойчивости канала связи между RFID-считывателем и транспондером. Одним из способов повышения устойчивости RFID-систем к внешним помехам является использование методов поляризационной обработки сигналов. Применение антенн с различными типами поляризации, а также организация дифференциальной схемы измерения позволяют уменьшить влияние отражённых сигналов и повысить стабильность измерений в ограниченных пространствах с большим количеством отражающих поверхностей.

Особенности работы пассивных WISP

Современные аппаратно-программные комплексы, предназначенные для дистанционного мониторинга физических величин и беспроводной передачи данных в УВЧ-диапазоне, классифицируются как беспроводные идентификационные и сенсорные платформы (WISP – Wireless Identification and Sensing Platform). Технологически они базируются на использовании стандартных RFID-считывателей и специализированных транспондеров (пассивного или полупассивного типа).

Устройство WISP обеспечивается энергией несущей частоты RFID-считывателя, а встроенный микроконтроллер собирает данные с подключённого датчика. Для связи со считывателем, WISP использует протоколы стандарта EPC Global [1].

Предложенная выше реализация беспроводной идентификационно-сенсорной платформы получила широкое применение в различных сферах, однако уже на данном этапе можно отметить несколько недостатков. Данное интегральное исполнение содержит в себе микропроцессор, который сам по себе увеличивает стоимость всей платформы. Также стоит отметить увеличение энергопотребления датчика, которое ввиду своего высокого показателя значительно уменьшает дальность действия связи с RFID-считывателем [2].

Дифференциальный способ измерения физических параметров окружающей среды

Беспроводная идентификационно-сенсорная платформа – это система, базированная на радиочастотной идентификации, включающая в свой состав сенсор (интегрированный или выносной), упрощённая схема предлагаемой реализации изображена на рис. 1 [3].

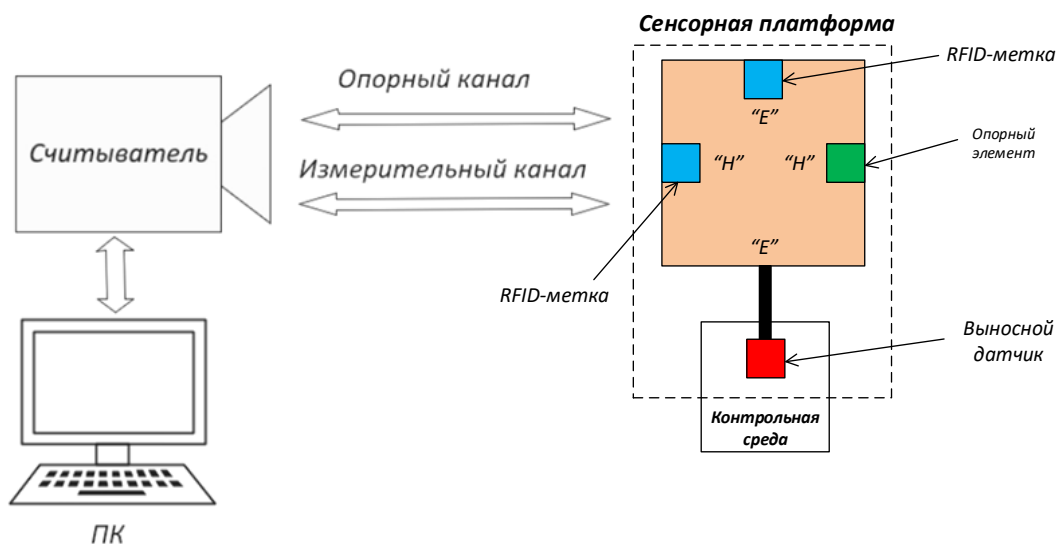


Рис. 1. Схема работы с WISP-устройством

Разрабатываемая УВЧ беспроводная идентификационно-сенсорная платформа контроля локальных значений среды исправляет вышеперечисленные недостатки. Она представляет собой систему из пассивной RFID-метки, настроенной на рабочий диапазон 860-960 МГц патч-антенны с круговой поляризацией и симметричными опорным и измерительным каналами, выносного температурного датчика и, непосредственно, программного обеспечения для управления считывателем и контроля полученных данных. Принцип работы данного экспериментального макета основан на изменении импеданса антенны за счёт изменения комплексного сопротивления температурного датчика. Изменяя несущую частоту считывателя в заданном частотном диапазоне, программное обеспечение фиксирует значения пороговой чувствительности WISP-устройства на резонансной частоте. Эти данные сопоставляются с калибровочной характеристикой и, с помощью алгоритма пересчёта с заданной точностью вычисляется температура окружающей среды [4].

Использование антенны с круговой поляризацией позволяет использовать дифференциальный метод измерения. Идея использования дифференциального метода заключается в использовании опорного канала, относительно которого производится измерение локальных физических параметров среды. Опорный элемент не подвержен изменению своих характеристик в зависимости от измеряемого параметра окружающей среды, что позволяет использовать разность значений с двух каналов для измерения.

Для снижения ориентационной зависимости пороговой чувствительности от направления транспондера в пространстве обычно используют считыватель, излучающий поле круговой поляризации. При этом возникают неизбежные потери на поляризационное рассогласование антенны считывателя и антенны транспондера. Несогласованность поляризационных базисов антенн считывателя и меток обуславливает дополнительные поляризационные потери, которые в среднем составляют 3 дБ. Также данный способ позволяет стабильно работать только в свободном от местных предметов (источников переотражения) канале связи.

Было предложено использовать линейно-поляризованный облучающий сигнал считывателя, который представляется как сумма круговых поляризаций правого и левого вращений для повышения помехоустойчивости WISP системы в ограниченном пространстве, наполненном большим количеством отражающих поверхностей (рис. 2).

Рассмотрим распространение в пространстве волны согласной круговой поляризации после «разложения» линейно-поляризованной волны от считывателя и определим дифракционный множитель.

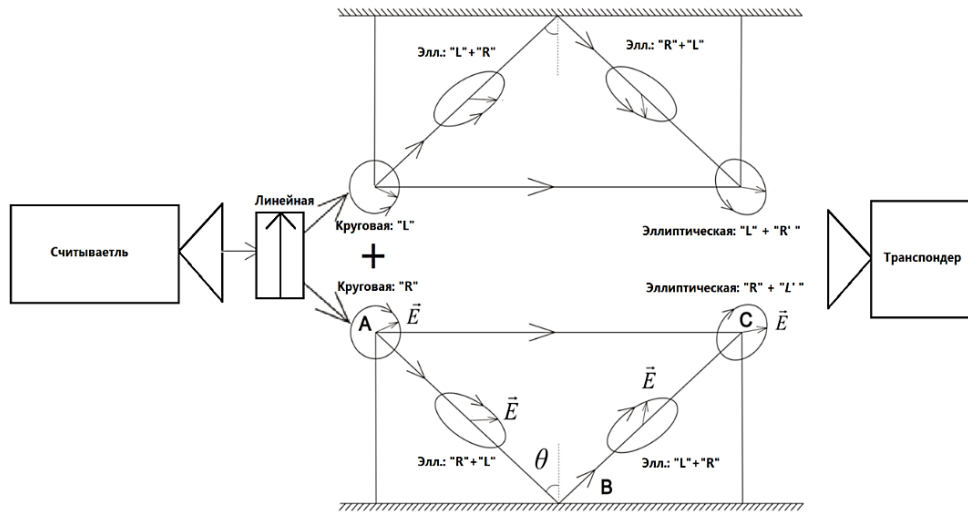


Рис. 2. Расположение волны линейной поляризации на две круговые и их отражение от подстилающей поверхности

При падении на отражающую поверхность волны с круговой поляризацией, например, правого вращения (согласная поляризация), отражённый сигнал деполаризуется (обусловлено изменением разности фаз и соотношением амплитуд между ортогональными составляющими отраженного поля), и, будет в общем случае иметь эллиптическую поляризацию. Совокупный сигнал в точке расположения антенны метки можно представить в виде прямого луча с согласной поляризацией, например правого вращения, и суперпозиции полей, отраженных от соответствующих отражающих поверхностей [5]:

$$\dot{E}_{\Sigma}^R(\theta_i, \varphi_i) = \dot{E}_0^R + \dot{E}_{omp\Sigma}^{el}(\theta_i, \varphi_i) \quad (1)$$

где $\dot{E}_{omp\Sigma}^{el}(\theta_i, \varphi_i)$ – совокупное эллиптически поляризованное поле отраженных сигналов от соответствующих отражающих поверхностей.

В круговом поляризационном базисе $\dot{E}_{omp\Sigma}^{el}(\theta_i, \varphi_i)$ можно представить в виде суммы двух полей, правого (согласного) и левого (кроссового) вращений с соответствующими значениями амплитуд и разности фаз между ними (рис. 2):

$$\dot{E}_{omp\Sigma}^{el}(\theta_i, \varphi_i) = \dot{E}_{omp\Sigma}^R(\theta_i, \varphi_i) + \dot{E}_{omp\Sigma}^L(\theta_i, \varphi_i) \quad (2)$$

С учетом (1.33) и (1.34) полное поле в точке приема можно представить в виде:

$$\begin{cases} \dot{E}_{omp\Sigma}^R(\theta_i, \varphi_i) = \bar{e}_R(\dot{E}_0^R + \sum_{i=1}^m \dot{E}_{отр m}^R) = \bar{e}_R(\dot{E}_0^R + \sum_{i=1}^m |\dot{R}_m^R| \frac{\sqrt{60PG_2}}{r_m} F_2^V(\theta_m, \varphi_m) e^{-j(kr_m - \varphi_m^R)}), \\ \dot{E}_{omp\Sigma}^L(\theta_i, \varphi_i) = \bar{e}_L(\sum_{i=1}^m |\dot{R}_m^L| \frac{\sqrt{60PG_2}}{r_m} F_2^H(\theta_m, \varphi_m) e^{-j(kr_m - \varphi_m^L)}), \end{cases} \quad (3)$$

где \bar{e}_R и \bar{e}_L – орт-векторы для право- (согласной) и лево- (кроссовой) поляризованных волн;

$$\dot{E}_0^R = \frac{\sqrt{60 \cdot P \cdot G_2}}{r_0} e^{-jk r_0}$$

– комплексная амплитуда напряженности поля прямого луча при ориентации максимума

диаграммы направленности антенны считывателя на метку; G_2 – коэффициент усиления антенны считывателя

на согласной круговой поляризации поля в направлении на метку; r_0 – длина пути прямого луча; r_m – длина пути

m -х отраженных лучей; m – порядковый номер отраженного луча; $F_2^V(\theta_m, \varphi_m)$ и $F_2^H(\theta_m, \varphi_m)$ – функции направленности антенн круговой поляризации поля считывателя в вертикальной и горизонтальной плоскостях

для углов падения (θ_m, φ_m) [6]; $\dot{R}_m^R = |\dot{R}_m^R| \cdot \exp(j \cdot \varphi_m^R)$ и $\dot{R}_m^L = |\dot{R}_m^L| \cdot \exp(j \cdot \varphi_m^L)$ – комплексные коэффициенты отражения Френеля для право- и лево- поляризованных волн, отражающихся от соответствующих отражающих поверхностей:

$$\dot{R}_m^R = \frac{1}{2}(\dot{R}_m^H + \dot{R}_m^V) = |\dot{R}_m^R| \cdot e^{j \cdot \varphi_m^R}; \quad (4)$$

$$\dot{R}_m^L = \frac{1}{2}(\dot{R}_m^H - \dot{R}_m^V) = |\dot{R}_m^L| \cdot e^{j \cdot \varphi_m^L}; \quad (5)$$

$$|\dot{R}_m^R| = \left\{ [\operatorname{Re}(\dot{R}_m^R)]^2 + [\operatorname{Im}(\dot{R}_m^R)]^2 \right\}^{1/2};$$

$$|\dot{R}_m^L| = \left\{ [\operatorname{Re}(\dot{R}_m^L)]^2 + [\operatorname{Im}(\dot{R}_m^L)]^2 \right\}^{1/2}; \quad (6)$$

$$\operatorname{Re}(\dot{R}_m^R) = \operatorname{Re}(\dot{R}_m^H) + \operatorname{Re}(\dot{R}_m^V);$$

$$\operatorname{Im}(\dot{R}_m^R) = \operatorname{Im}(\dot{R}_m^H) + \operatorname{Im}(\dot{R}_m^V);$$

$$\operatorname{Re}(\dot{R}_m^L) = \operatorname{Re}(\dot{R}_m^H) - \operatorname{Re}(\dot{R}_m^V);$$

$$\operatorname{Im}(\dot{R}_m^L) = \operatorname{Im}(\dot{R}_m^H) - \operatorname{Im}(\dot{R}_m^V); \quad (7)$$

$$\varphi_m^R = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\operatorname{Im}(\dot{R}_m^R)}{\operatorname{Re}(\dot{R}_m^R)} \right\};$$

$$\varphi_m^L = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\operatorname{Im}(\dot{R}_m^L)}{\operatorname{Re}(\dot{R}_m^L)} \right\}. \quad (8)$$

Нормируя уравнение (3) по \dot{E}_0^R , несложно получить компоненты дифракционного множителя для поля круговой поляризации зондирующих сигналов:

$$\begin{cases} \dot{\Phi}_\Sigma^R = \dot{E}_\Sigma^R / \dot{E}_0^R = 1 + \sum_{i=1}^m \frac{\dot{E}_{\text{отр}}^R}{\dot{E}_0^R} = 1 + \sum_{i=1}^m |\dot{R}_m^R| \frac{r_0}{r_m} F_2^V(\theta_m, \varphi_m) e^{-j(k\Delta r_m - \varphi_m^R)}, \\ \dot{\Phi}_\Sigma^L = \dot{E}_\Sigma^L / \dot{E}_0^R = \sum_{i=1}^m |\dot{R}_m^L| \frac{r_0}{r_m} F_2^H(\theta_m, \varphi_m) e^{-j(k\Delta r_m - \varphi_m^L)}. \end{cases} \quad (9)$$

На рис. 3 представлен принцип работы транспондера.

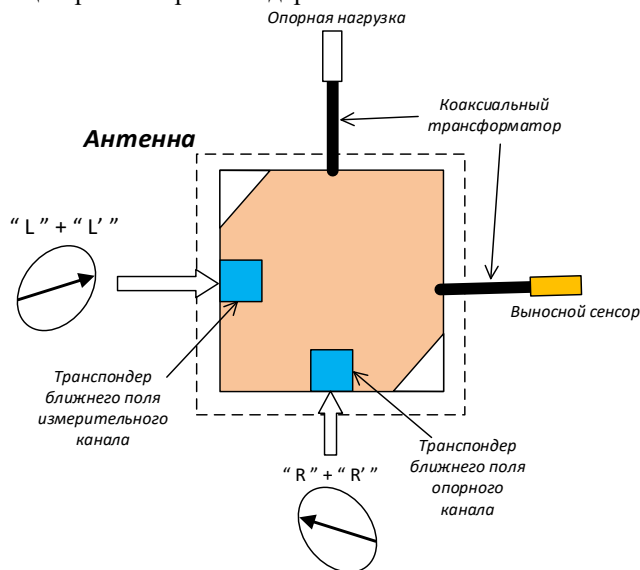


Рис. 3. Принцип работы транспондера

Опорный канал принимает сумму полей прямой (R) и побочной (R') правой поляризации. Измерительный канал принимает сумму полей прямой (L) и побочной (L') левой поляризации. В нормальных условиях проводится калибровка системы WISP, частотная характеристика опорной нагрузки антенны не изменяется от влияния физических параметров локальной среды, в отличие от выносного сенсора. Это позволяет компенсировать интерференционную нелинейность среды распространения для обоих каналов.

Следовательно, полное поле в точке приема характеризуется наличием эллиптически поляризованных компонент. При наличии в антенно-фидерных трактах считывателя и метки поляризационных дуплексеров (разделителей) можно производить поляризационную обработку сигналов с целью повышения помехоустойчивости пассивных RFID систем.

Заключение

Рассмотрен способ повышения помехоустойчивости пассивной сенсорной RFID-системы за счёт применения поляризационной обработки сигналов и дифференциального метода измерения. Проведён анализ особенностей функционирования беспроводных идентификационно-сенсорных платформ УВЧ-диапазона, а также факторов, ограничивающих стабильность их работы в условиях многолучевого распространения радиоволн и наличия отражающих поверхностей. Показано, что использование линейно-поляризованного сигнала считывателя совместно с антенной транспондера, имеющей симметричные каналы с круговой поляризацией, позволяет уменьшить влияние поляризационных потерь и повысить устойчивость системы к интерференционным искажениям. Применение дифференциальной схемы измерения с опорным и измерительным каналами обеспечивает компенсацию влияния среды распространения и повышает точность определения контролируемых физических параметров. Рассмотрена математическая модель распространения электромагнитных волн с учётом отражений и поляризационных преобразований сигнала. Полученные выражения для полного поля и дифракционного множителя позволяют оценить влияние отражённых компонент на работу RFID-системы и обосновать эффективность предложенного подхода.

Таким образом, применение поляризационной обработки сигналов в сочетании с дифференциальным методом измерения является перспективным направлением повышения помехоустойчивости пассивных RFID-сенсорных платформ, предназначенных для эксплуатации в сложных условиях распространения радиоволн. Предложенный подход может быть использован при разработке энергоэффективных систем дистанционного мониторинга физических параметров окружающей среды.

Список использованных источников

1. Measurement Based Evaluation of the Wireless Identification and Sensing Platform / Ramos V. E. // Technische Universität Wien, 2015. – P. 3-5.
2. Беспроводной мониторинг состояния окружающей среды с использованием технологии RFID и резонансных свойств обратного рассеяния пассивных радиочастотных идентификаторов УВЧ диапазона / Кирильчук В. Б. [и др.] // Информационные радиосистемы и радиотехнологии, 2022 – с. 69-71.
3. Wireless Identification and Sensing Platform Version 6.0 / Smith J. [et al.] // SenSys '22, 2022. – P. 899-900.
4. Электромагнитный сенсорный RFID транспондер с пространственным разнесением зон измерения и приема-передачи данных / Побудей Ю. Р. [и др.] // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024 – с. 101-103.
5. Электромагнитный сенсорный RFID транспондер с дифференциальной схемой измерения физических параметров среды / Мартыненко И. Д. [и др.] // Информационные радиосистемы и радиотехнологии, 2024 – с. 104-106.
6. Разработка методов построения электронных средств дистанционного сбора, обработки, хранения и передачи информации на основе пассивных и полупассивных сенсорных элементов, и устройств радиочастотной идентификации УВЧ диапазона / Кирильчук В. Б. [и др.] // ГБЦ № 21-3160, 2025 – с. 32-35.