

УДК 621.391

Разнесенный прием сигналов ZigBee в условиях коррелированных замираний

Фаустов И. С., Манелис В. Б.

Постановка задачи: активное развитие технологий IoT требует совершенствования методов и средств контроля беспроводных сетей, в частности сетей ZigBee. Службами радиоконтроля решается задача обнаружения и идентификации абонентов таких сетей. При решении этой задачи может использоваться антенная решетка (АР), которая позволяет не только определить направление на источник, но и существенно повысить помехоустойчивость приема за счет использования сигналов на элементах АР. **Целью работы** является исследование возможности повышения помехоустойчивости обнаружения и приема сигналов стандарта 802.15.4 (ZigBee) в релейском канале посредством разнесенного приема при произвольной корреляции сигналов на элементах АР. **Методы:** в работе использованы методы статистического компьютерного моделирования, которые учитывают замирания, возникающие из-за многолучевости канала распространения, и корреляцию сигналов на элементах АР, вызванную их близким расположением. **Новизна:** разработка и анализ алгоритмов разнесенного приема сигналов стандарта 802.15.4 (ZigBee) в релейском канале при произвольной корреляции сигнала на антенных элементах выполнено впервые. Элементами новизны являются алгоритмы объединения результатов обнаружения, частотно-временной синхронизации и демодуляции, полученных для различных антенных элементов. **Результаты:** выигрыш в помехоустойчивости за счет разнесенного приема сигнала ZigBee в релейском канале по сравнению с одноантенным приемом достигает 7.5 дБ при двух приемных элементах и 15 дБ – при четырех приемных элементах. Этот выигрыш уменьшается с увеличением уровня пакетной ошибки и корреляции сигналов на антенных элементах. Даже при сильной корреляции (до 0.8) помехоустойчивость приема лишь незначительно уступает случаю отсутствия корреляции. **Практическая значимость:** предложенные алгоритмы разнесенного приема предназначены для реализации в цифровых радиоприемных устройствах радиоконтроля и позволяют существенно увеличить помехоустойчивость обнаружения и приема сигнала ZigBee. В частности, они используются в российских комплексах радиоконтроля беспроводных сетей ближнего радиуса действия на базе АРК-Д11 и АРК-Д19Р. Высокая эффективность алгоритмов даже при сильной корреляции на антенных элементах позволяет для целей радиоконтроля успешно использовать АР с близко расположенными элементами.

Ключевые слова: разнесенный прием, ZigBee, антенная решетка.

Введение

В последние годы широкое распространение получили беспроводные системы связи между устройствами (интернет вещей – IoT), характеризующиеся относительно невысокой скоростью передачи и низкой стоимостью терминалов. Одной из наиболее распространенных технологий IoT ближнего действия является IEEE 802.15.4 (ZigBee) [1], которая обеспечивает передачу различных

Библиографическая ссылка на статью:

Фаустов И. С., Манелис В. Б. Разнесенный прием сигналов ZigBee в условиях коррелированных замираний // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 1. С. 220-231. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-220-231

Reference for citation:

Faustov I. S., Manelis V. B. Antenna diversity combining for ZigBee over correlated fading. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 1, pp. 220-231 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-220-231

видов информации со скоростью до 250 кбит/с, что достаточно для мониторинга и управления устройствами.

Для планирования и эксплуатации этих сетей, проверки соответствия требований к параметрам передатчиков, контроля зон покрытия, проверки соблюдения частотно-территориального плана операторам сетей, службам радиомониторинга и органам государственной безопасности необходимо регулярно проводить обнаружение и идентификацию источников сигналов ZigBee [2-4].

Поскольку радиус действия ZigBee устройств небольшой, часто измерения проводятся при низком отношении сигнал-шум, что приводит к пропуску сигналов. В связи с этим актуальной является задача повышения помехоустойчивости радиоконтроля. В представленной работе для этого используется антенная решетка (АР). Ее применение позволяет не только расширить функциональные возможности радиоконтроля за счет адресного пеленгования [5-6], но и значительно расширить зону действия приемной аппаратуры, повысить вероятность правильного обнаружения и безошибочного приема идентификаторов устройств ZigBee.

Одним из подходов использования АР является такое взвешенное суммирование сигналов антенных элементов, при котором осуществляется формирование луча в направлении на источник [8-10]. Однако этот эффективный метод, как правило, имеет значительную вычислительную сложность, особенно в случае большого числа элементов АР. Как следствие, его практическая реализация сопряжена с большими трудностями или вовсе невозможна. Кроме того, в городских условиях и внутри помещений часто имеет место многолучевой канал распространения и, как следствие, замирание сигнала. В этих условиях корреляция сигнала на элементах АР уменьшается [11, 12], и эффективность данного метода существенно снижается.

Другим методом повышения помехоустойчивости является разнесенный прием. Данный подход, напротив, более эффективно работает при отсутствии корреляции сигнала на элементах АР. Поскольку расстояние между элементами АР – небольшое, обычно имеет место некоторая корреляция даже в случае многолучевого нестационарного канала.

Разнесенный прием различных сигналов рассматривался в [13-15] и др. Эти исследования, как правило, ограничивались характеристиками демодуляции без рассмотрения необходимых сопутствующих процедур обнаружения, частотно-временной синхронизации и оценки канала. При этом рассмотрение разнесенного приема для сигналов ZigBee в известной литературе отсутствует.

Целью настоящей работы является разработка и анализ полного комплекса алгоритмов разнесенного приема для обнаружения и идентификации сигналов стандарта 802.15.4 (ZigBee) при произвольной корреляции сигнала на элементах АР.

Основные особенности сигналов ZigBee в диапазоне 2,4 ГГц

Наибольшее распространение на физическом уровне получил частотный диапазон 2,4 ГГц, где используется 16 каналов, центральные частоты которых определяются выражением $f_n = 2405 + 5 \cdot (n - 11)$, где n – номер канала ZigBee.

Устройства ZigBee имеют бюджетный опорный генератор, вследствие чего нестабильность рабочей частоты может достигать $4 \cdot 10^{-5}$ [1].

Для передачи данных ZigBee использует модуляцию O-QPSK (Offset Quadrature Phase-Shift Keying) с прямым расширением спектра (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum). Каждый передаваемый символ расширяется комплексной чиповой последовательностью длиной 16 чипов, действительная и мнимая части которой сдвинуты друг относительно друга на пол чипа. Возможны 16 различных чиповых последовательностей, каждая из которых определяет 4 информационных бита. Сигнал каждого чипа формируется с помощью полусинусоидального импульса. Обмен данными осуществляется в виде фреймов, длительность которых варьируется от 352 до 4256 мкс. Структура фрейма представлена на рис.1.

4 байта	1 байт	7 бит	1 бит	2 ÷ 21 байт		2 байта
Преамбула	SFD	Длина	Резерв	MAC-заголовок	Данные	CRC
Синхропоследовательность		РНУ-заголовок		Поле данных MAC-уровня		

Рис. 1. Структура фрейма сигнала IEEE 802.15.4.

Каждый фрейм начинается с преамбулы, состоящей из 8 одинаковых известных символов. Далее следует разделительное поле SFD (Start-of-Frame Delimiter), которое вместе с преамбулой образует известную синхропоследовательность, используемую для обнаружения сигнала и его синхронизации.

Заголовок физического (РНУ) уровня содержит информацию о длине поля данных MAC-уровня, выраженную в байтах. В заголовке MAC-уровня указывается порядковый номер передаваемых данных, а также информация, необходимая для идентификации сети, отправителя и получателя в пределах данной сети. Завершающую часть каждого фрейма составляют два проверочных байта, сформированных на основе битов, содержащихся в поле данных MAC-уровня.

Основные обозначения

В таблице 1 представлен перечень используемых в статье обозначений.

Таблица 1 – Используемые обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
$x_i^{(n)}$	– отсчеты комплексного видеосигнала приемной антенны, где верхний индекс (n) соответствует порядковому номеру приемной антенны, i – порядковый номер отсчета
N_{RX}	– количество элементов AP
$f_s = 4$	– частота следования отсчетов входного комплексного видеосигнала в МГц
$\tau_D = 16$	– длительность символа в мкс
$D = f_s \cdot \tau_D = 64$	– длина символа в отсчетах
r_i	– комплексные отсчеты синхропоследовательности, где i – порядковый номер отсчета
$P = 10D = 640$	– длина синхропоследовательности в отсчетах

Обозначение	Физический смысл обозначения
$J = 8D = 512$	– длина преамбулы в отсчетах
$\tau = 4$	– длительность когерентного накопления в мкс
$M = f_s \cdot \tau = 16$	– длина когерентного накопления в отсчетах
$K = J / M$	– количество блоков когерентного накопления
$Y_{i,k}^{(n)}$	– результат когерентного накопления для отсчетов преамбулы, где верхний индекс (n) соответствует порядковому номеру приемной антенны, k – порядковый номер блока, i – порядковый номер отсчета
$U_{i,k}^{(n)}$	– результат когерентного накопления для отсчетов SFD, где верхний индекс (n) соответствует порядковому номеру приемной антенны, k – порядковый номер символа, i – порядковый номер отсчета
$u_i^{(n)}$	– отсчеты комплексного видеосигнала после коррекции частотной расстройки, где верхний индекс (n) соответствует порядковому номеру приемной антенны, i – порядковый номер отсчета

Общая схема разнесенного приема

На рис. 2. представлена общая схема разнесенного приема сигналов ZigBee. Исходными данными являются отсчеты видеосигнала с различных элементов AP.

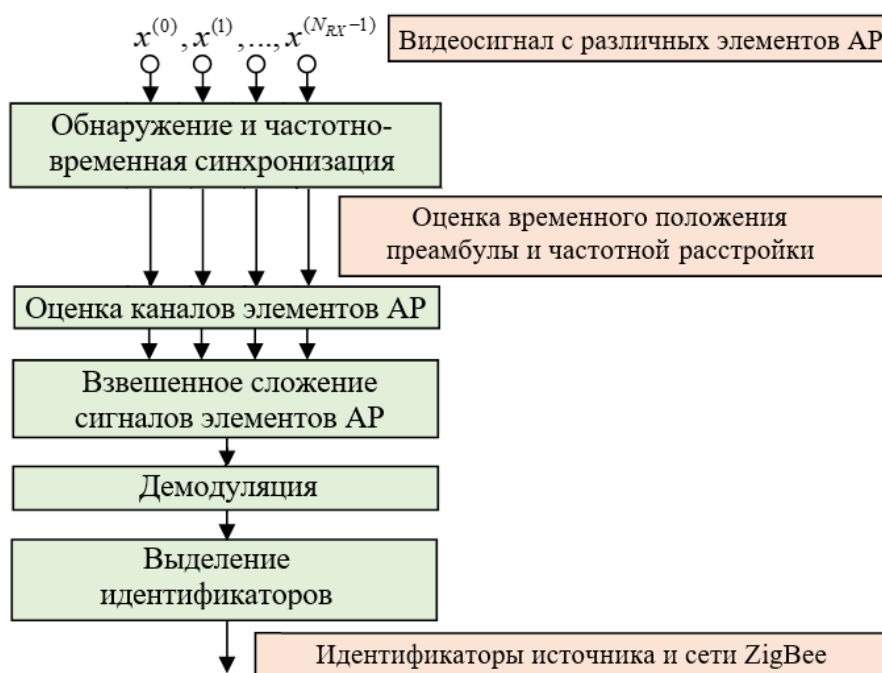


Рис. 2. Схема разнесенного приема сигнала ZigBee

Особенностью процедуры обнаружения и частотно-временной синхронизации является использование сигналов всех элементов AP, что позволяет получать более точные оценки временного положения и частотной расстройки. При этом применяется когерентное накопление сигналов различных элементов AP на коротких интервалах с последующим некогерентным сложением. Такой подход позволяет избежать деградации результатов когерентной обработки при наличии существенной частотной расстройки, характерной для устройств

ZigBee. Расчет обоснованного значения длительности когерентного накопления приведен в [2].

Учитывая малую длительность пакета, можно считать каналы распространения элементов AP квазистационарными. Поэтому оценки канальных коэффициентов находятся по синхропоследовательности и используются для всего пакета в виде весовых коэффициентов при суммировании сигналов элементов AP.

В процедуре демодуляции в отличие от традиционных методов, в работе предложен усовершенствованный метод с итеративной фазовой подстройкой, что позволяет минимизировать вероятность пакетной ошибки при значительной нестабильности рабочей частоты. Из полученных после демодуляции бит выделяются идентификационные данные.

Рассмотрим приведенные процедуры более подробно.

Обнаружение сигнала и частотно-временная синхронизация

На первом этапе для отсчетов анализируемого временного интервала формируется решающая функция, которая сравнивается с порогом γ_1

$$\Lambda_i = \sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \left(\frac{\sum_{k=0}^{K-1} |Y_{i,k}^{(n)}|}{\sum_{j=0}^{J-1} |x_{i+j}^{(n)}|^2} \right) \geq \gamma_1, \quad (1)$$

$$Y_{i,k}^{(n)} = \sum_{m=0}^{M-1} x_{i+M \cdot k+m}^{(n)} \cdot r_{M \cdot k+m}^* \quad (2)$$

В случае непревышения решающей функцией порога принимается решение об отсутствии сигнала в наблюдаемой реализации.

В противном случае принимается предварительное решение об обнаружении преамбулы и выносится предварительная оценка ее временного положения $i_0 = \arg \max_i \Lambda_i$. Кроме того, по усредненной разности фаз результатов соседних блоков когерентного накопления рассчитывается предварительная оценка частотного рассогласования

$$\Delta f_1 = \frac{1}{2\pi\tau} \arg \left(\sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \sum_{k=1}^{K-1} Y_{i_0,k}^{(n)} Y_{i_0,k-1}^{(n)*} \right), \quad (3)$$

где $\arg(\cdot)$ – фаза комплексного числа, лежащая в пределах $\pm\pi$.

На втором этапе осуществляется поиск SFD с учетом предварительной оценки частотного рассогласования (3). Решающая статистика второго этапа сравнивается с порогом второго этапа γ_2

$$\Upsilon_i = \sum_{n=0}^{N_{RX}-1} \left(\frac{U_{i,0}^{(n)} + U_{i,1}^{(n)}}{\sum_{k=0}^{2D-1} |x_{i+k}^{(n)}|^2} \right) \geq \gamma_2, \quad i \in [N_1; N_2], \quad (4)$$

$$U_{i,k}^{(n)} = \sum_{m=0}^{D-1} r_{J+k \cdot D+m}^* \cdot x_{i+k \cdot D+m}^{(n)} \cdot \exp\left(-j \cdot 2\pi \Delta f_1 \cdot \frac{i+k \cdot D+m}{f_s}\right), \quad (5)$$

где $N_1 = i_0 + J - D$, $N_2 = i_0 + J + D$ – начало и окончание априорного интервала временного положения SFD.

В случае превышения порога фрейм сигнала ZigBee считается обнаруженным. Окончательная оценка временного положения начала фрейма равна $i_2 = i_1 - J$, где $i_1 = \arg \max_{i \in [N_1; N_2]} Y_i$ – оценка временного положения SFD. Окончательная оценка частотного рассогласования определяется выражением

$$\Delta f = \Delta f_1 + \frac{1}{2\pi\tau_D} \cdot \arg\left(\sum_{n=0}^{N_{RX}-1} U_{i_1,1}^{(n)} \cdot U_{i_1,0}^{(n)*}\right). \quad (6)$$

После установления частотно-временной синхронизации выполняется компенсация частотной расстройки в каждом канале

$$u_i^{(n)} = x_i^{(n)} \exp\left(\frac{-j \cdot 2\pi \Delta f \cdot (i - i_2)}{f_s}\right), \quad n = 0, \dots, N_{RX} - 1. \quad (7)$$

Оценка канала и демодуляция

Весовые коэффициенты при сложении сигналов, принятых разными АЭ, находятся по синхропоследовательности в предположении, что каналные коэффициенты на интервале фрейма меняются незначительно

$$h^{(n)} = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{P-1} u_{i_2+i}^{(n)} \cdot r_i^*, \quad n = 0, \dots, N_{RX} - 1, \quad (8)$$

где верхний индекс (n) соответствует порядковому номеру приемной антенны.

Используя метод сложения каналов приема, максимизирующий отношение сигнал-помеха (MRC – Maximal Ratio Combining), получаем сигнал на выходе схемы суммирования [13]

$$y_i = \sum_{n=0}^{N_{RX}-1} h^{(n)*} \cdot u_i^{(n)}. \quad (9)$$

При демодуляции произвольного k -го символа формируются корреляционные отклики для каждой возможной чиповой последовательности с учетом фазовой подстройки по предыдущему символу

$$S_{k,m} = \sum_{i=0}^{D-1} y_{i_2+k \cdot D+i} \cdot s_{m,i}^* \cdot \exp(j\varphi_{k-1}), \quad m = 0, \dots, L - 1 \quad (10)$$

где $s_{m,i}$, $i = 0, \dots, D - 1$, – опорный сигнал символа, соответствующий m -й чиповой последовательности, $\varphi_k = \arg(S_{k,v_k})$ – фазовое рассогласование k -го и $k - 1$ символов, обусловленное изменением фазы во времени, $L = 16$ – число возможных чиповых последовательностей, $v_k = \arg \max_{m \in [0; L-1]} |S_{k,m}|$ – оценка номера пе-

редаваемой чиповой последовательности. По этому номеру определяются биты символа.

Сначала выполняется демодуляция символов заголовка физического уровня, из которого определяется длительность поля данных MAC-уровня. Затем выполняется демодуляция символов поля данных MAC-уровня. По принятым битам поля данных рассчитываются 16 проверочных бит. При условии, что все расчетные биты совпадают с принятыми проверочными битами, принимается решение о безошибочном приеме пакета. В этом случае из принятого заголовка MAC-уровня выделяются идентификаторы сети, отправителя и получателя.

Результаты моделирования

Анализ разработанных алгоритмов обнаружения, частотно-временной синхронизации и декодирования фреймов сигнала ZigBee был выполнен методом статистического компьютерного моделирования. Моделировались пакеты сигнала длиной 80 байт. В качестве канала связи использовалась модель неселективных по частоте релейских замираний. Пространственная корреляция сигнала на элементах AP ρ задавалась в соответствии с моделью [16, 17]. Частотный сдвиг сигнала выбирался случайным равномерно распределенным в интервале $[-100, 100]$ кГц.

На рис. 3 приведены характеристики помехоустойчивости приема для описанного выше алгоритма. Здесь значение $N_{RX} = 1$ соответствует одноантенному приему, $N_{RX} = 2$ – разнесенному приему на 2 антенных элемента, $N_{RX} = 4$ – разнесенному приему на 4 антенных элемента. На рис. 3а и рис. 3б приведена зависимость вероятности фреймовой ошибки P_E от отношения сигнал-шум (ОСШ) для различных значений корреляции ρ соответственно для $N_{RX} = 2$ и для $N_{RX} = 4$. Фрейм считался принятым с ошибкой как в случае пропуска сигнала при обнаружении, так и при ошибках демодуляции. Рис. 3в иллюстрирует зависимость помехоустойчивости приема для различного количества антенных элементов при отсутствии корреляции $\rho = 0$.

Основные результаты и выводы

В данной работе представлены алгоритмы разнесенного приема сигналов стандарта 802.15.4 (ZigBee), включая обнаружение, частотно-временную синхронизацию и оценку канала. Методом компьютерного моделирования выполнен их анализ в релейском канале при произвольной корреляции сигнала на антенных элементах. Показано, что выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с одноантенным приемом линейно растет с увеличением числа N_{RX} приемных антенных элементов. Этот выигрыш увеличивается с уменьшением допустимого уровня пакетной ошибки P_E и при снижении корреляции ρ сигналов на антенных элементах. Например, для $N_{RX} = 2$, $P_E = 5 \cdot 10^{-2}$ при $\rho = 0.99$

выигрыш по сравнению с одноантенным приемом составляет 3 дБ, при $\rho = 0.7$ – 7 дБ, при $\rho = 0$ – 7.5 дБ. Для $N_{RX} = 4$, $P_E = 5 \cdot 10^{-2}$ при $\rho = 0.99$ выигрыш по сравнению с одноантенным приемом составляет 6 дБ, при $\rho = 0.7$ – 14 дБ, при $\rho = 0$ – 15 дБ. Таким образом, даже при близком (сопоставимым с длиной волны) расположении антенных элементов (при сильной корреляции до $\rho = 0.7 \div 0.8$) помехоустойчивость приема незначительно хуже случая отсутствия корреляции $\rho = 0$.

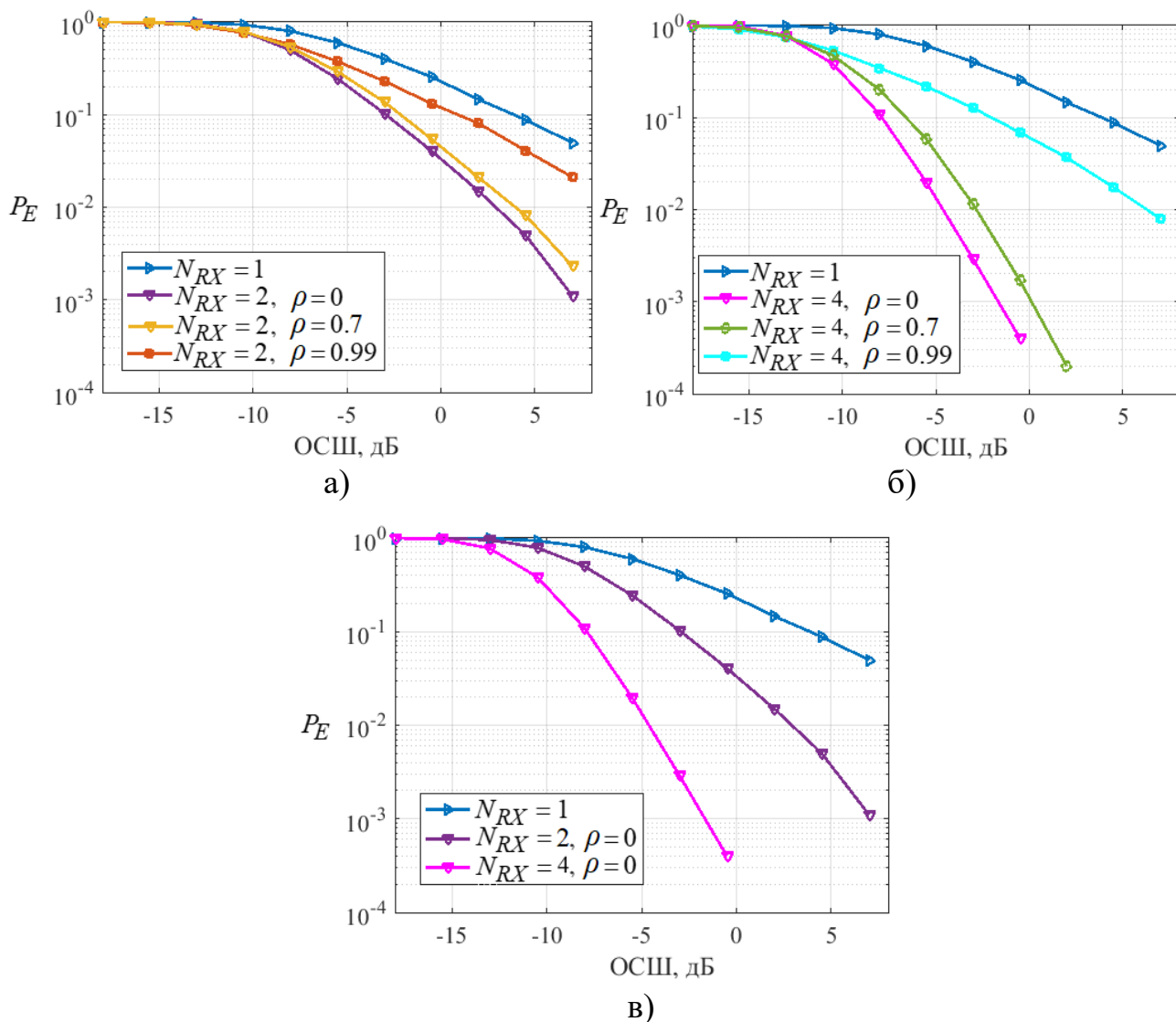


Рис. 3. Зависимость вероятности пакетной ошибки от ОСШ

Таким образом, использование разнесенного приема позволяет существенно расширить зону действия аппаратуры радиоконтроля, увеличить вероятность правильного обнаружения и безошибочного приема идентификаторов устройств ZigBee.

Разработанные алгоритмы реализованы в российских комплексах радиоконтроля на базе двухканального радиоприемного устройства АРК-Д11, а также моноимпульсной системы АРК-Д19Р производства АО «ИРКОС» [18]. Эти

комплексы применяются для планирования беспроводных сетей ближнего радиуса действия на этапах развертывания и ввода в эксплуатацию, анализа зон покрытия, а также радиоконтроля существующих сетей с целью проверки параметров передатчиков и их соответствия частотно-территориальному плану.

Литература

1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), in IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006), 5 Sept. 2011. – 314 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6012487.
2. Фаустов И. С., Манелис В. Б., Токарев А. Б., Козьмин В. А., Сладких В. А. Анализатор сигналов ZigBee // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 4. С. 65-70. doi: 10.36622/VSTU.2021.17.4.009.
3. Фаустов И. С., Токарев А. Б. Обнаружение и анализ сетей ZigBee // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2022. Т. 6. С. 106-114.
4. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / под ред. А. М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 424 с.
5. Фаустов И. С., Токарев А. Б. Адресное пеленгование устройств ZigBee // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 8. С. 83-88. doi: 10.18127/j00338486-202308-13.
6. Cidronali A., Collodi G., Lucarelli M., Maddio S., Passafiume M., Pelosi G. An IEEE 802.15.4 Wireless Half-Cubic NodeBased on a Switched-Beam Antenna for Indoor Direction of Arrival Estimation // 2020 17th European Radar Conference (EuRAD). – Utrecht, The Netherlands, 10–15 January 2021. – P. 286–289. doi: 10.1109/EuRAD48048.2021.00080.
7. Ермолаев В. Т., Сорокин И. С., Флакман А. Г., Ястребов А. В. Эффективность методов адаптивной обработки сигналов в многоэлементных антенных решетках // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. № 3. С. 14-19.
8. Li J., Stoica P. Robust Adaptive Beamforming. – NJ: John Wiley & Sons, – 2006. – 445 p.
9. Liberti J. C., Rappaport T. S. Smart Antennas for Wireless Communication: IS-95 and Third Generation CDMA Applications in IS-95. – NJ: Prentice Hall, – 1999. – 376 p.
10. Манелис В. Б., Каюков И. В. Алгоритмы формирования диаграммы направленности адаптивной антенной решетки в обратном и прямом каналах сотовой системы связи // Цифровая обработка сигналов. 2007. № 2. С. 35-40.
11. Pedersen K. I., Mogensen P. E., Fleury B. H. A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments // IEEE Trans. on Vehicular Technology. 2000. V. 49. № 2. P. 437–447.
12. Носов В. И. Методы повышения помехоустойчивости систем радиосвязи с использованием технологии MIMO и пространственно-временной

обработки сигнала. Монография / под общ. ред. М.Г. Кокорич – Новосибирск: СибГУТИ, 2014. – 316 с.

13. Proakis J. G. Digital Communications. – NY: McGraw-Hill, 1995. – 928 p.
14. Feher K. Wireless digital communications: modulation and spread spectrum applications. – NJ: Prentice Hall, 1995. – 544 p.
15. Eng T., Kong N., Milstein L. B. Comparison of diversity combining techniques for Rayleigh-fading channels // IEEE Transactions on Communications. – 1996. V. 44. № 9. P. 1117-1129. doi: 10.1109/26.536918.
16. Shiu D., Foschini G. J., Gans M. J., Kahn J. M. Fading Correlation and Its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems // IEEE Transaction on Communications. 2000. V. 48. №. 3. P. 502-513.
17. Cho Y. S., Kim J., Yang W. Y., Kang C. G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. – NJ: John Wiley & Sons, 2010. – 439 p.
18. Каталог ИРКОС 2024. Автоматизированные системы и технические средства радиоконтроля [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://www.ircos.ru/zip/cat2024.pdf> (дата обращения 31.01.2024).

References

1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), in IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006), 5 Sept. 2011. – 314 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6012487.
2. Faustov I. S., Manelis V. B., Tokarev A. B., Kozmin V. A., Sladkikh V. A. ZigBee signal analyzer. *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 65-70. doi: 10.36622/VSTU.2021.17.4.009 (in Russian).
3. Faustov I. S., Tokarev A. B. Detection and analysis ZigBee Networks. *Sbornik trudov XXVIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Radiolokacija, navigacija, svjaz'»* [Proceedings of the XXVIII International Scientific and Technical Conference «Radar, Navigation, communications»]. Voronezh, 2022, vol. 6, pp. 106-114 (in Russian).
4. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A. *Avtomatizirovannyye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty* [Automated radio monitoring systems and their components]. Moscow, Hotline-Telecom, 2017. 424 p. (in Russian).
5. Faustov I. S., Tokarev A. B. Address direction finding of ZigBee devices. *Radiotekhnika*, 2023, vol. 87, no. 8, pp. 83–88. doi: 10.18127/j00338486-202308-13 (in Russian).
6. Cidronali A., Collodi G., Lucarelli M., Maddio S., Passafiume M., Pelosi G. An IEEE 802.15. 4 Wireless Half-Cubic NodeBased on a Switched-Beam Antenna for Indoor Direction of Arrival Estimation. *2020 17th European Radar Conference (EuRAD)*. Utrecht, The Netherlands, 10–15 January 2021, pp. 286–289. doi: 10.1109/EuRAD48048.2021.00080
7. Ermolayev V. T., Sorokin I. S., Flaksman A. G., Yastrebov A. V. The efficiency of adaptive signal processing algorithms for antenna with a large number of elements. *Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics*, 2014, no. 3, pp. 14-19 (in Russian).

8. Li J., Stoica P. *Robust Adaptive Beamforming*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. 445 p.
9. Liberti J. C., Rappaport T. S. *Smart Antennas for Wireless Communication: IS-95 and Third Generation CDMA Applications in IS-95*. New Jersey, Prentice Hall, 1999. 376 p.
10. Manelis V. B., Kayukov I. V. Algoritmy formirovaniya diagrammy napravlenosti adaptivnoj antennoj reshetki v obratnom i pryamom kanalah sotovoj sistemy svyazi [Algorithms for generating the radiation pattern of an adaptive antenna array in the up and down channels of a cellular communication system]. *Digital Signal Processing*, 2007, no. 2, pp. 35-40 (in Russian).
11. Pedersen K. I., Mogensen P. E., Fleury B. H. A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2000, vol. 49, no. 2, pp. 437-447.
12. Nosov V. I. *Metody povysheniya pomexoustojchivosti sistem radiosvyazi s ispol'zovaniem tekhnologii MIMO i prostranstvenno-vremennoj obrabotki signala: Monografiya* [Methods of increasing the noise immunity of radio communication systems using MIMO technology and spatio-temporal signal processing: Monograph]. Novosibirsk, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, 2014, 316 p.
13. Proakis J. G. *Digital Communications*. New York, McGraw-Hill, 1995. 928 p.
14. Feher K. *Wireless digital communications: modulation and spread spectrum applications*. New Jersey, Prentice Hall, 1995. 544 p.
15. Eng T., Kong N., Milstein L. B. Comparison of diversity combining techniques for Rayleigh-fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 1996, vol. 44, no. 9, pp. 1117-1129. doi: 10.1109/26.536918.
16. Shiu D., Foschini G. J., Gans M. J., Kahn J. M. Fading Correlation and Its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems. *IEEE Transaction on Communications*, 2000, vol. 48, no. 3, pp. 502-513.
17. Cho Y. S., Kim J., Yang W. Y., Kang C. G. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2010. 439 p.
18. IRCOS JSC Catalog. Automated systems and technical means of radio monitoring. 2024. Available at: <https://www.ircos.ru/zip/cat2024.pdf> (accessed 31.01.2025). (in Russian).

Статья поступила 10 января 2025 г.

Информация об авторах

Фаустов Иван Сергеевич – аспирант кафедры радиотехники. Воронежский государственный технический университет. АО «ИРКОС». Научный сотрудник. Область научных интересов: радиомониторинг, алгоритмы приема и обработки сигналов. E-mail: faustov.97@bk.ru

Манелис Владимир Борисович – доктор технических наук. Ведущий научный сотрудник. АО «ИРКОС». Область научных интересов: системы связи, ра-

диомониторинг, алгоритмы приема и обработки сигналов. E-mail:
vbm@ircoc.vrn.ru

Адрес: 394024, Россия, г. Воронеж, Рабочий пр., д. 101б.

Antenna diversity combining for ZigBee over correlated fading

I. S. Faustov, V. B. Manelis

Purpose. The active development of IoT requires the improvement of methods and controls for wireless networks, in particular ZigBee networks. Radio monitoring services solve the problem of detecting and identifying subscribers of such networks. When solving this problem, an antenna array can be used, which allows not only to determine the direction to the source, but also to significantly increase the noise immunity of receiving by using signals on the elements of the antenna array. **The aim** of the work is to investigate the possibility of increasing the noise immunity of detecting and receiving signals of the IEEE 802.15.4 (ZigBee) in the Rayleigh channel by means of distributed receiving with arbitrary correlation of signals on the antenna array elements. **Methods.** The paper uses statistical computer modeling methods that take into account fading due to multipath propagation channel and signal correlation on antenna array elements caused by their close location. **Novelty.** The development and analysis of algorithms for the distributed receiving of IEEE 802.15.4 signals in a Rayleigh channel with arbitrary signal correlation on antenna elements has been performed for the first time. The novelty elements are algorithms for combining the results of detection, time-frequency synchronization and demodulation obtained for various antenna elements. **Results.** The results of the study showed that the gain in noise immunity due to the different reception of the ZigBee signal in the Rayleigh channel, compared with single-antenna receiving, reaches 7.5 dB with two receiving elements and 15 dB with four receiving elements. This gain decreases with an increase in the level of packet error and signal correlation on the antenna elements. Even with a strong correlation (up to 0.7-0.8), the noise immunity of reception is only slightly inferior to the case of the absence of correlation. **Practical relevance.** The proposed algorithms of diversity receiving are designed for implementation in digital radio monitoring devices and can significantly increase the noise immunity of detecting and receiving the ZigBee signal. In particular, they are used in Russian short-range wireless network monitoring complexes based on ARK-D11 and ARK-D19R. The high efficiency of the algorithms, even with strong correlation on the antenna elements, makes it possible to successfully use an antenna array with closely spaced elements for radio monitoring purposes.

Key words: diversity receiving, ZigBee, antenna array.

Information about Authors

Ivan Sergeevich Faustov – Postgraduate student of the Department of Radio Engineering. Voronezh State Technical University. Research Associate. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, algorithms for receiving and processing signals. E-mail: faustov.97@bk.ru

Vladimir Borisovich Manelis – Dr. habil. of Engineering Sciences. Leading Researcher. JSC «IRCOS». Field of research: communication systems, radiomonitoring, algorithms for receiving and processing signals. E-mail: vbm@ircoc.vrn.ru
Address: 394024, Russia, Voronezh, Rabochiy prospect, 101b.