Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.391. 26

By
Вьет Хынг

Синхронизация в широкополосных системах связи

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра технических наук
по специальности 7-06-0713-03 *Радиосистемы и радиотехнологии*

Научный руководитель
Карпушкин Эдуард Михайлович
Доцент кафедры ИРТ БГУИР
Кандидат технических наук, доцент

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспроводные технологии являются неотъемлемой частью повседневной жизни, обеспечивая функционирование ключевых сфер — от гражданской мобильной связи до специализированных систем спутниковой связи, радиолокации и радиоизмерений. По мере развития этих систем постоянно возрастают требования к надежности передачи данных, помехоустойчивости и эффективности использования радиочастотного спектра. Одним из наиболее перспективных решений данных задач является использование широкополосных сигналов (ШПС), обладающих высокой базой ($B \gg 1$), что позволяет обеспечивать скрытность передачи и устойчивость к организованным помехам,.

Однако реализация преимуществ ШПС напрямую зависит от эффективности систем синхронизации. Традиционные методы поиска сигнала по времени и частоте зачастую становятся «узким местом», ограничивающим скорость установления связи и увеличивающим аппаратную сложность. В связи с этим в данной работе исследуются технологии использования псевдослучайных сигналов и предлагаются решения по повышению надежности систем связи за счет внедрения беспоисковых методов приема,.

Работа структурно разделена на несколько этапов:

1. Анализ характеристик и преимуществ различных типов ПСП (М-последовательностей и ЧКП);
2. Визуальный и математический анализ свойств функции неопределенности, позволяющих реализовать мгновенную синхронизацию;
3. Синтез структуры, расчет характеристик и оценка практической эффективности предложенного беспоискового приемника;
4. Моделирование архитектуры беспоискового системы в среде *MATLAB.*

Таким образом, исследование направлено на совершенствование систем передачи информации, работающих в сложных помеховых условиях и требующих минимального времени на вхождение в синхронизм,.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: В эпоху современных беспроводных коммуникаций (5G/6G) требования к высокой скорости соединения и сверхнизкой задержке (Ultra-Low Latency) стали критически важными. Традиционные системы, использующие широкополосные сигналы (ШПС), требуют сложного двухэтапного процесса синхронизации: первичного поиска и слежения. Однако последовательный поиск в области временной неопределенности создает недопустимые задержки для сервисов реального времени. Разработка беспоисковых приемников, позволяющих исключить этап сканирования задержек, является актуальной задачей для оптимизации системных ресурсов.

Степень разработанности проблемы

Временная синхронизация является неотъемлемой частью современных широкополосных (ШП) систем связи, радионавигации и радиолокации. Основной задачей при создании таких систем является разработка эффективного алгоритма оценки временного положения принимаемого ШП сигнала. В отечественных и зарубежных источниках, в частности в работах М. И. Мазуркова, В. Б. Пестрякова и Э. М. Карпушкина, уделяется значительное внимание теории сложных сигналов и методам их обработки.

В данной работе анализируется известный последовательный метод поиска, в частности определяется необходимое среднее время поиска в зависимости от отношения сигнала к шуму и вероятности ошибочного приема в канале связи. Также в работе рассматривается **беспоисковый метод приема**, который позволяет исключить процедуру сканирования области временной неопределенности и обеспечить мгновенное вхождение в синхронизм.

Цель и задачи исследования:

- **Цель:** Изучение методов сокращения времени поиска при использовании ШПС, а также синтез и анализ архитектуры беспоискового приемника.

- **Задачи:**
    1. Оценка среднего времени поиска в традиционных системах.
    2. Исследование функции неопределенности (ФН) М-последовательностей и четверично-кодированных последовательностей (ЧКП).

3. Синтез структуры беспоискового приемника на основе специфических свойств ФН.
4. Сравнительный анализ эффективности беспоисковых и поисковых систем.

Объект исследования: Схемы слежения за временным положением и беспоисковые схемы приема.

Предмет: Системы синхронизации ШПС.

Теоретическая и методологическая основа исследования:

В основу диссертации легли результаты известных исследований белорусских и зарубежных специалистов в области широкополосных систем связи и сигналов, а также оптимального приема радиосигналов, таких как М. И. Мазурков, В. Б. Пестряков, Э. М. Карпушкин, В. А. Чердынцев и другие.

Все расчеты и полученные результаты, касающиеся анализа функции неопределенности и эффективности беспоискового приемника, подтверждались экспериментальными данными и исследованиями на моделях оценки временного положения радиосигнала.

Информационная база исследования сформирована на основе фундаментальной и учебной литературы, открытой технической информации, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна: Математически обосновано фундаментальное свойство ФН: при перемножении сигнала с его копией, задержанной на половину длительности символа ($\tau_0/2$), в спектре произведения возникает составляющая на тактовой частоте $F_T = 1/\tau_0$. Амплитуда этой составляющей составляет $1/\pi$ относительно основного пика АКФ, что позволяет достичь мгновенной синхронизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическое обоснование возникновения тактовой составляющей в ФН ПСП при определенных временных сдвигах.
2. Архитектура беспоискового автокорреляционного приемника, исключающая процедуры сканирования задержек.

3. Обоснование эффективности применения данной структуры в радиолиниях со средней энергетикой в качестве устройства предварительной синхронизации.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов:

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 61-й и 62-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР.

Публикации:

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций. Общий объем публикаций 5 страниц.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четыри глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассматриваются обзор литературы по широкополосных системам (ШПС)

Во второй главе рассматриваются функция неопределенности некоторые псевдослучайных последовательности.

В третьей главе Синтез структуры беспоискового приемника.

В четвертой главе представлены результаты компьютерного моделировании в среде *MATLAB.*

Общий объем диссертационной работы составляет 62 страниц. Из них 45 страниц основного текста, 27 иллюстраций, список собственных публикаций соискателя из 3 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1: Широкополосные системы (ШПС)

Рассматриваются принципы формирования сложных сигналов, база которых $B = F \cdot T \gg 1$. Проведена классификация ШПС: МЧ-сигналы, БФМ-сигналы, ДЧ-сигналы и ДСЧ-сигналы. Подробно описаны методы генерации М-последовательностей (на основе регистров сдвига) и ЧКП (на основе матриц Адамара). Отмечены преимущества ШПС: помехоустойчивость, скрытность и кодовое разделение каналов (CDMA).

Проанализированы этапы вхождения в синхронизм: начальный поиск и слежение. Рассмотрены методы последовательного и параллельного поиска, выявлены их недостатки (длительное время или высокая аппаратная сложность). Описаны контуры слежения за задержкой (DLL) и контуры с разделением времени (TDL).

Среднее время получения синхронизации при использовании последовательного поиска

$$\overline{T}_{acq} = \frac{(2 - P_D)(1 + KP_{FA})}{P_D}(N_c \lambda T_c)$$

где λTc — интервал поиска, *PD* — вероятность правильного обнаружения, *PFA* — вероятность ложной тревоги.

Средняя длительность процесса обнаружения при использовании параллельного поиска

$$\overline{T}_{acq} = \lambda T_c P_D + 2\lambda T_c P_D (1 - P_D) + 3\lambda T_c P_D (1 - P_D)^2 + \ldots = \frac{\lambda T_c}{P_D}$$

Глава 2: Функция неопределенности (ФН)

Проведен детальный анализ ФН для М-последовательностей и ЧКП. Исходя из общего определения ФН через нормированную двумерную АКФ, получим для одиночной М-последовательности значности N:

$$\rho(\tau, f) = \frac{1}{2E}\int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(t)\dot{A}^*(t-\tau)\exp[-j2\pi ft]dt = \frac{1}{N\tau_0}\sum_{i=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} a_i a_l \int_{\tau}^{N\tau_0} rect\left[t - \tau_0(i-1)\right] rect\left[t - \tau_0(l-1) - \tau\right]\exp[-j2\pi ft]dt =$$

$$= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} a_i a_l \frac{1}{\tau_0}\int_{\tau}^{N\tau_0} rect(t) rect(t - \tau_1)\exp\left[-j2\pi f\left(t - (i-1)\tau_0\right)\right]dt =$$

$$= \frac{1}{N}\left[\sum_{i=1}^{N-n} a_i a_{i+n}\exp\left[-j2\pi f\tau_0(i-1)\right]\frac{1}{\tau_0}\int_{0}^{\varepsilon}\exp[-j2\pi ft]dt + \sum_{i=1}^{N-(n+1)} a_i a_{i+n+1}\exp[-j2\pi f\tau_0 i]\frac{1}{\tau_0}\int_{\varepsilon}^{\tau_0}\exp[-j2\pi ft]dt\right] =$$

$$= \frac{1}{N}\left[\rho_0(\varepsilon, f)\sum_{i=1}^{N-n} a_i a_{i+n}\exp\left[-j2\pi f\tau_0(i-1)\right]\right] + \rho_0(\tau_0 - \varepsilon, f)\sum_{i=1}^{N-(n+1)} a_i a_{i+n+1}\exp[-j2\pi f\tau_{0i}]$$

где $0<\tau=(n\tau_0+\varepsilon)<N\tau_0$, $n=0,1,2,...,(N-1)$; $0<\varepsilon<\tau_0$, $\rho_0(\tau_1,f)$ - двумерная корреляционная функция импульса прямоугольной формы длительности τ_0 и единичной амплитуды:

$$\rho_0(\tau_1, f)=(1-\frac{|\tau_1|}{\tau_0})\frac{\sin \pi f\tau_0(1-\frac{|\tau_1|}{\tau_0})}{\pi f\tau_0(1-\frac{|\tau_1|}{\tau_0})}$$

Доказано, что сечение ФН плоскостью $f=1/\tau_0$ при задержке $\tau=\tau_0/2$ содержит ярко выраженную составляющую.

Аплитуда составной гармоники $f=1/\tau_0$

$$\left|\rho\left(\frac{\tau_0}{2},\frac{1}{\tau_0}\right)\right|=\frac{1}{2N}\left|\frac{\sin\frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}}\cos\pi\left[\sum_{i=1}^{N}a_i^2+\cos\pi\sum_{i=1}^{N-1}a_ia_{i+1}\right]\right|=\frac{1}{N}\left|\frac{1}{\pi}(-1)\left[N-\frac{1{,}25}{\sqrt{N}}\right]\right|\approx\frac{1}{\pi}$$

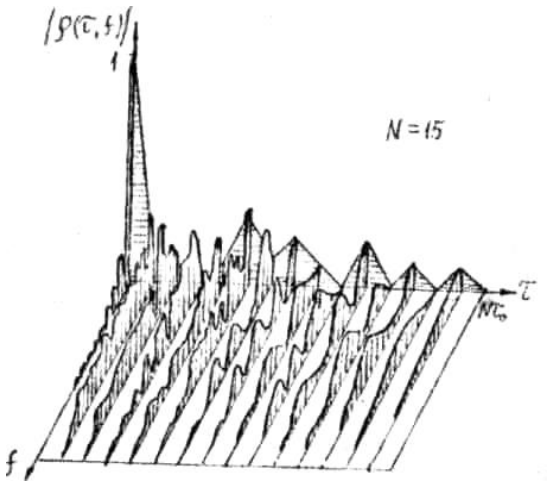


Рисунок 1 – Двумерная ФН М-последовательности с N = 15

Особености ФН ЧКП в отличие от М-последовательностей и других бинарных последовательностей является наличие выброса в сечении ФН плоскостью $\tau=\tau_0$ на частоте $f=1/4\tau_0=f_T/4$.

При $\tau=\tau_0/2$, $f=1/\tau_0$ ФН ЧКП, как и ФН М-последовательности, имеет устойчивый выброс:

$$\left|\rho\left(\frac{\tau_0}{2},\frac{1}{\tau_0}\right)\right|=\frac{1}{2N}\left|\frac{\sin\frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2}}\cos\pi\sum_{i=1}^{N}a_i^{\,2}\cos 2\pi i+\sum_{i=1}^{N}a_ia_{i+1}\cos 2\pi i\right|=\frac{1}{N\pi}\left[N\mp1\right]\approx\frac{1}{\pi}$$

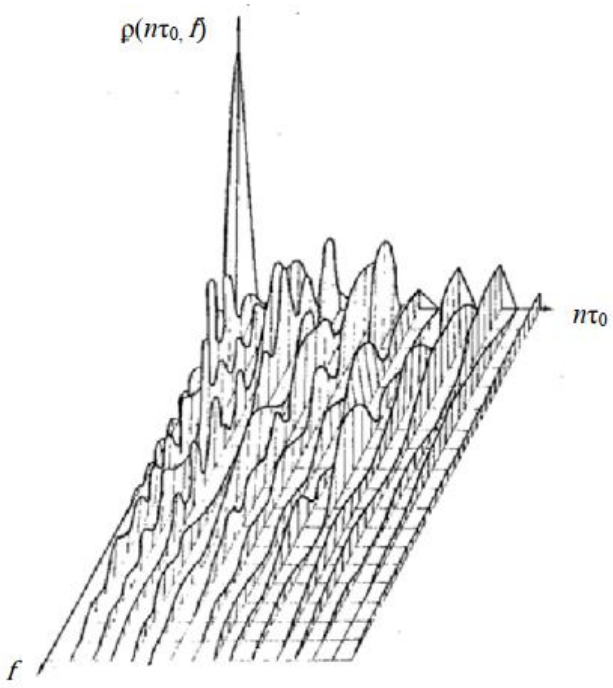


Рисунок 2 – Двумерная функция неопределености ЧКП с N = 16

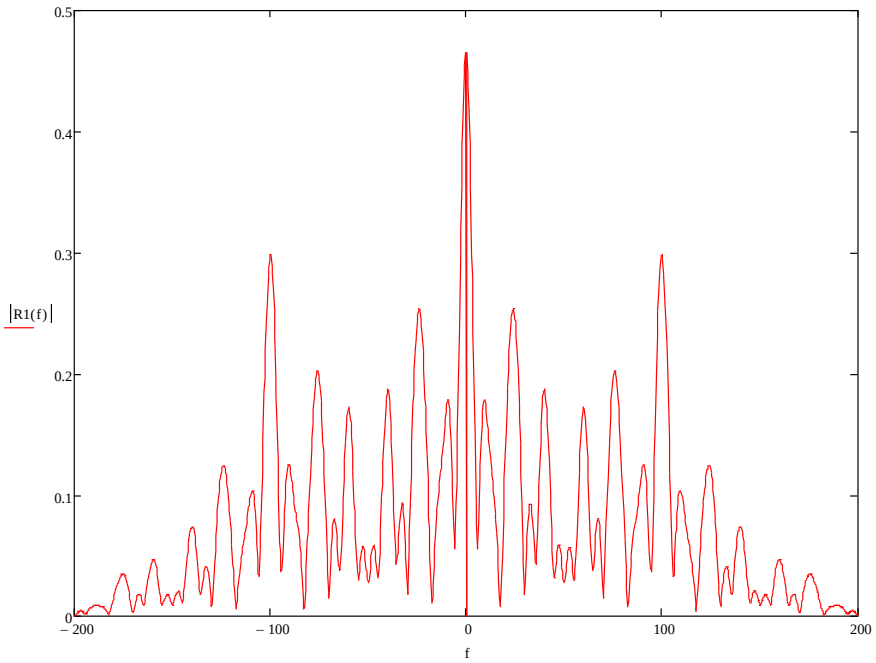


Рисунок 3 – Сечение ФН ЧКП с N=16 при $\tau = \tau_0 / 2$ ($\tau_0 = 0.01$).

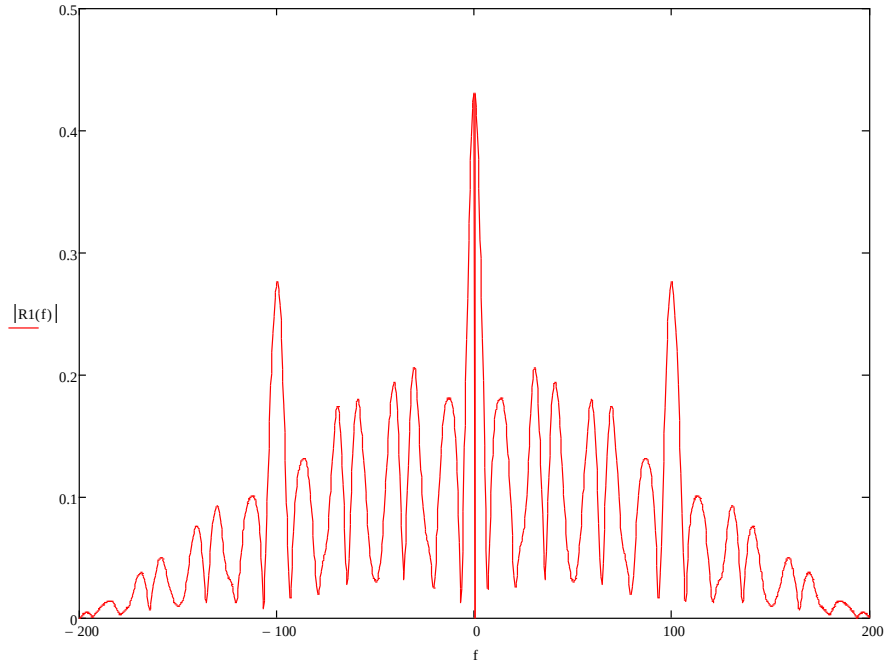


Рисунок 4 – Сечение ФН М-последовательности с N=15 при $\tau = \tau_0 / 2$ ($\tau_0 = 0.01$).

Глава 3: Синтез структуры беспоискового приемника

Модуляция исходные информации:

$$S_i(t) \to U_i(t) = \begin{Bmatrix} U_1(t) \to "1" \\ U_2(t) = -U_1(t - t_з) \to "0" \end{Bmatrix}, \text{ где } t_з = (2n-1)\frac{\tau_0}{2},$$

где $n = 1,2,\ldots$, ; τ_0 - длительность элементарного символа ПСП. $\rho_{1,2} \approx 0$.

На основе свойств ФН предложена схема автокорреляционного приемника:

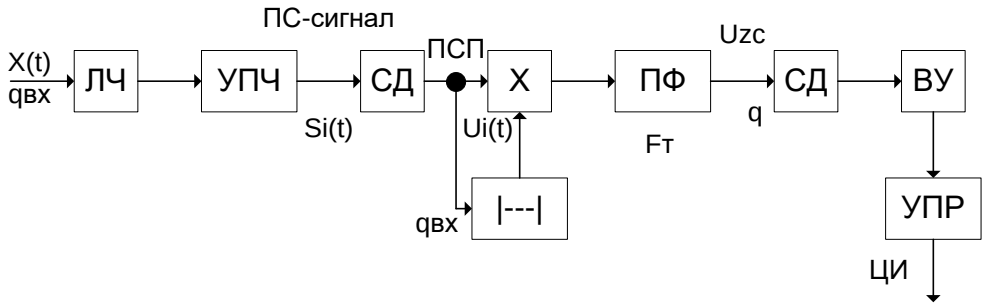


Рисунок 5 – Структура автокорреляционного приемника

Прициппа работа беспоискового приемника:

1. **Перемножение:** Входной сигнал X(t) перемножается со своей копией, задержанной на $\tau_0 / 2$.
2. **Выделение частоты:** С помощью полосового фильтра, настроенного на частоту $F_T = 1/\tau_0$, выделяется тактовая составляющая.
3. **Демодуляция:** Последующая обработка синхронным детектором позволяет извлечь цифровую информацию без предварительного поиска начала последовательности.
4. **Эффективность:** На вход перемножителя поступает аддитивная смесь сигнала и шума. Выходной сигнал Z(t) формируется путем умножения текущей смеси на её задержанную копию:

$$Z(t) = [U(t) + n(t)] \cdot \left[U(t - \frac{\tau_0}{2}) + n(t - \frac{\tau_0}{2}) \right] = U(t)U(t - \frac{\tau_0}{2}) + U(t - \frac{\tau_0}{2})n(t) + n(t - \frac{\tau_0}{2})U(t) + n(t)n(t - \frac{\tau_0}{2})$$

Отношение сигнал/шум на выходе решающего устройства определяется как отношение мощности полезного сигнала к мощности помех в полосе фильтрации:

$$q = \frac{4}{\pi^2} \frac{q_{вх}^2}{1 + 2q_{вх}} B$$

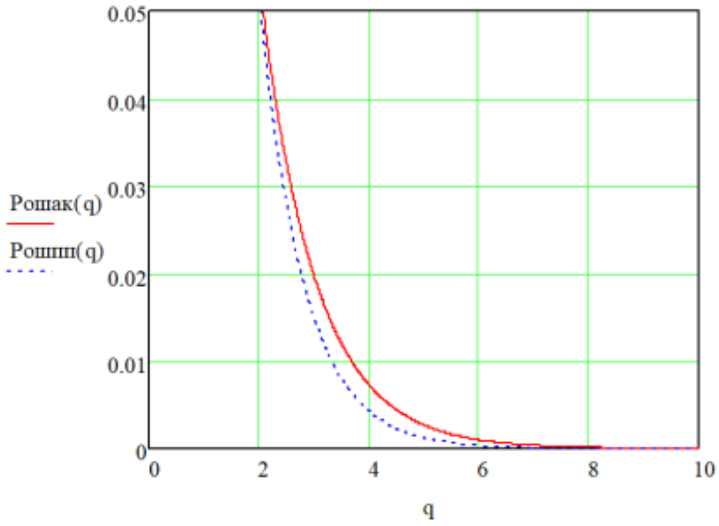


Рисунок 6 – Зависимость вероятности ошибки оценки временного положения от отношения сигнал/шум

Расчеты показывают, что при $P_{ОШ} \approx 0,001$ автокорреляционный прием проигрывает когерентному около **4 дБ**. Однако исключение времени поиска делает его оптимальным для систем с жесткими требованиями к задержке.

Глава 4: Компьютерное моделирование в среде matlab

Представлены результаты компьютерного моделировании в среде *MATLAB.* Проведенное в среде Simulink моделирование подтвердило работоспособность беспоискового приемника и возможность эффективного восстановления цифровой информации из смеси сигнала с шумом. Результаты подтверждают, что предложенная архитектура обеспечивает мгновенную синхронизацию, хотя и требует дальнейшей оптимизации фазовой синхронизации для минимизации временных задержек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Доказано, что специфические свойства ФН ПСП позволяют реализовать беспоисковую синхронизацию.
2. Синтезированная архитектура приемника полностью устраняет время поиска (), обеспечивая мгновенный захват сигнала.
3. Установлено, что беспоисковый приемник является эффективным решением для упрощения аппаратной части и минимизации задержек в сетях 5G/6G и системах специальной связи.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Тезисы конференций

1.By Вьет Хынг, Линейкая конструкция кода для системы распределения симметричных ключей/ Митюхин А.И. – к.т.н.,доцент // 61 научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»: сборник тезисов докладов конференции по направлению 8: Информационные системы и технологии (Минск, 21-25 апреля 2025 года). - Минск: БГУИР, 2025. - 60 с.: ил.

2. By Вьет Хынг, Исследование функции неопределености ПСП/ Карпушкин Э.М. – к.т.н.,доцент // 62-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 15-16 апреля 2026 г., БГУИР, Минск, Республика Беларусь : сборник материалов конференции. – Минск. – 2026. – 285 с.; ил.

3.By Вьет Хынг, Моделирование беспоиского приемника/ Карпушкин Э.М. – к.т.н.,доцент // 62-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 15-16 апреля 2026 г., БГУИР, Минск, Республика Беларусь : сборник материалов конференции. – Минск. – 2026. – 285 с.; ил.