

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБНАРУЖИТЕЛЯ СИГНАЛОВ С LORA МОДУЛЯЦИЕЙ

Терновой Н.А.

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

Каленкович Е.Н. – старший преподаватель кафедры ИРТ

В работе рассматриваются методы обнаружения сигналов с LoRa-модуляцией, широко применяемой в устройствах Интернета вещей для передачи телеметрических данных – температуры, влажности и других параметров – а также в системах управления беспилотными летательными аппаратами (протокол ExpressLRS и подобные). Проведён сравнительный анализ основных методов обнаружения: дечирпирования на основе БПФ, корреляционного обнаружения, согласованной фильтрации, энергетического и дифференциального обнаружения. Представлены результаты моделирования, позволяющие оценить применимость каждого метода на практике.

Беспроводные технологии давно перестали быть уделом смартфонов и Wi-Fi роутеров. Сегодня они пронизывают промышленность, сельское хозяйство, логистику и даже управление летательными аппаратами. Одной из наиболее востребованных технологий в этой области стала LoRa (Long Range) – метод модуляции на основе расширенного спектра с линейной частотной манипуляцией (CSS, Chirp Spread Spectrum), разработанный компанией Semtech. Его отличительные черты – большая дальность связи (до 15–20 км в условиях прямой видимости), низкое энергопотребление и высокая помехоустойчивость – сделали его стандартом де-факто в системах Интернета вещей (IoT).

Коммерческие LoRa-модули семейства SX1276/SX1278 сегодня используются повсеместно: датчики температуры и влажности на складах и фермах, трекеры местоположения транспорта, счётчики воды и газа – всё это передаёт данные именно через LoRa в рамках протокола LoRaWAN. Однако наиболее динамично развивающимся направлением стало применение LoRa в управлении беспилотными летательными аппаратами. Протокол ExpressLRS (ELRS), построенный на базе LoRa-чипов, обеспечивает задержку менее 1 мс и дальность связи пилота с дроном свыше 30 км – характеристики, недостижимые для традиционных RC-систем. Именно поэтому ELRS стал стандартом в гоночных и FPV-дронах, а также активно рассматривается в задачах мониторинга и доставки. Столь широкое распространение технологии порождает встречную задачу – обнаружение и идентификацию LoRa-сигналов, актуальную для радиомониторинга спектра, обеспечения электромагнитной совместимости и противодействия несанкционированному использованию дронов.

В работе рассматриваются и сравниваются шесть основных подходов к обнаружению LoRa-сигналов. Наиболее распространённым является метод дечирпирования с последующим БПФ: принятый сигнал перемножается с опорным чирпом, после чего в частотной области появляется выраженный пик, соответствующий символу. Метод прост в реализации и обеспечивает хорошую чувствительность. Корреляционный метод и согласованный фильтр близки по сути – оба основаны на вычислении меры сходства принятого сигнала с эталонным, различаясь реализацией в частотной и временной областях соответственно. Обнаружение по частотной линии в IQ-плоскости эксплуатирует характерную для LoRa линейную траекторию мгновенной частоты. Энергетическое обнаружение – наиболее простой метод, не требующий знания параметров сигнала, однако наименее помехоустойчивый. Дифференциальное обнаружение анализирует разность фаз между соседними отсчётами, что позволяет снизить требования к синхронизации.

Сравнительное моделирование показало, что метод на основе БПФ обеспечивает наилучшее соотношение между вычислительной сложностью и качеством обнаружения при типичных для LoRa значениях отношения сигнал/шум. Энергетический метод, несмотря на простоту, резко деградирует при SNR ниже –10 дБ, что критично для задач дальней связи. Методы на основе согласованного фильтра и корреляции демонстрируют сопоставимые результаты, однако требуют предварительного знания параметров сигнала – коэффициента растяжения (SF) и полосы пропускания. Дифференциальное обнаружение показало устойчивость к частотным рассогласованиям, что делает его перспективным для мониторинга подвижных объектов, в частности дронов с характерным доплеровским сдвигом. Таким образом, выбор метода определяется условиями применения: для стационарных IoT-сетей оптимален БПФ-подход, тогда как для задач обнаружения подвижных объектов предпочтительны дифференциальные и корреляционные методы.

Список использованных источников:

1. Semtech Corporation. SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. Datasheet, Rev. 7, 2020. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276>.
2. Berni A.J., Gregg W.D. On the Utility of Chirp Modulation for Digital Signaling // IEEE Transactions on Communications. – 1973. – Vol. 21, No. 6. – P. 748–751. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1091721>.