

Технический доклад: Метод помех LoRa на основе VCO

White Paper / Technical Brief (Draft for review)

Аннотация

В этом документе описывается практический метод создания помех для LoRa-связи с использованием генератора, управляемого напряжением (VCO), и динамического управления частотой. Рассматривается классическая схема линейного «sweep» и её ограничения при работе с модуляцией LoRa, а также предлагается улучшенный подход: случайная сегментация диапазона и «jitter» частоты для более равномерного покрытия и снижения «провалов» по спектру. В конце приведены наблюдения и результаты тестов, которые помогают оценить стабильность и эффективность подхода.

Содержание

1. Введение
2. Основы помех на основе VCO
3. Спектральные характеристики метода сканирования, управляемого NE555
4. 5. Усовершенствованный метод управления VCO на основе псевдослучайных кодов
5. 6. Анализ эффективности помех и преимуществ в условиях противодействия
6. 7. Заключение

1. Введение

С быстрым развитием беспилотных летательных аппаратов и низкоскоростных широкополосных систем связи (таких как LoRa), их применение в гражданской и специализированной сферах значительно расширилось. Параллельно с этим активно развиваются технологии радиочастотного противодействия и подавления.

Традиционные методы широкополосных шумовых помех или фиксированного частотного сканирования постепенно теряют эффективность против интеллектуальных систем связи, обладающих адаптивной перестройкой частоты, оценкой канала и выбором оптимальных частотных точек.

В этом контексте управляемые методы сканирующих помех на основе VCO (Voltage Controlled Oscillator — генератор с управляемым напряжением), благодаря гибкой структуре, высокой скорости перестройки и низкой стоимости реализации, получили широкое применение в системах РЭБ. В данной работе проводится системный анализ традиционного метода управления VCO с помощью NE555, его ограничений, а также рассматривается усовершенствованный метод управления VCO на основе псевдослучайных кодов (идей LoRa).

2. Основы помех на основе VCO

VCO — это генератор, выходная частота которого изменяется в зависимости от управляющего напряжения. Его ключевая характеристика описывается следующим выражением:

$$f_{out} = f(V_T) \quad f_{out} = f(V_T)$$

где $V_{TV_TV_T}$ — управляющее напряжение, подаваемое на вход настройки VCO (вывод V_T).

В определённом диапазоне выходная частота VCO находится в приближённо линейной зависимости от величины напряжения $V_{TV_TV_T}$.

2.1 Традиционная схема на базе NE555

В традиционных схемах обычно используется таймер NE555, работающий в астабильном режиме, для формирования периодически изменяющегося аналогового сигнала (пилообразной или треугольной формы). Сформированный сигнал напрямую подаётся на вход настройки VCO (вывод V_T).

По мере периодического увеличения и уменьшения управляющего напряжения выходная частота VCO осуществляет возвратно-поступательное сканирование в заданном частотном диапазоне, формируя

широкополосный помеховый сигнал с непрерывным частотным покрытием.

Рис. 1. Структурная схема модуля помех с управлением VCO с помощью NE555

Структура системы может быть обобщена следующим образом:

блок формирования сигнала (NE555)

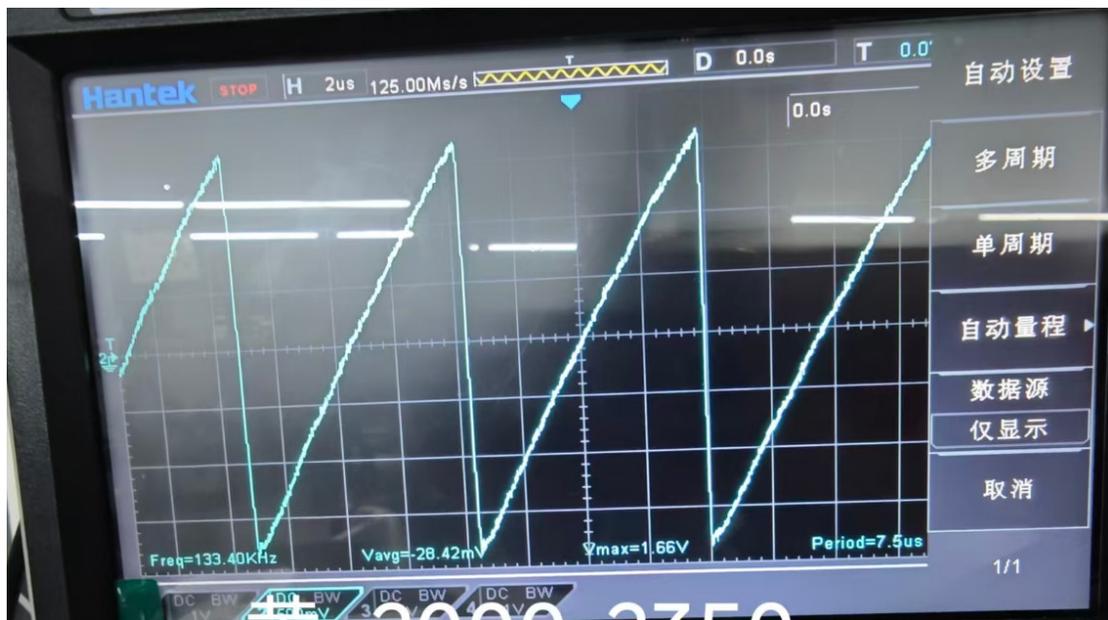
блок частотной настройки по напряжению (вход V_T VCO)

тракт радиочастотного выхода и усиления

Данная структура отличается простотой и наглядностью, легко реализуется на практике и получила широкое распространение в ранних системах радиочастотного подавления.

С выхода таймера NE555 на вход настройки V_T генератора VCO подаётся пилообразный или треугольный сигнал, форма которого показана на рис. 2.

Рис. 2. Пилообразная форма сигнала на выходе таймера NE555



3. Спектральные характеристики метода сканирования, управляемого NE555

Выходной пилообразный или треугольный сигнал, формируемый таймером NE555, обладает следующими типичными характеристиками:

строгая периодичность

фиксированная амплитуда и постоянный наклон

высокая повторяемость формы сигнала

При подаче данного сигнала на вход настройки V_T генератора VCO его выходная частота начинает непрерывно изменяться с постоянной скоростью в пределах заданного частотного диапазона. На спектроанализаторе это проявляется в виде непрерывно развёрнутой полосы сканирующей энергии, которая теоретически обеспечивает полное покрытие целевого диапазона связи.

Однако в реальных системах, вследствие наличия следующих неидеальных факторов:

нелинейности и джиттера выходного сигнала таймера NE555

нелинейной характеристики настройки VCO

синхронизации скорости сканирования с системным тактовым сигналом

шума и задержек отклика в аналоговом тракте

в процессе частотного сканирования на отдельных частотных точках время удержания энергии оказывается чрезвычайно малым, а в спектральном представлении это может проявляться в виде локальных частотных провалов.

С выхода таймера NE555 на вход настройки V_T генератора VCO подаётся пилообразный или треугольный сигнал; соответствующая форма сигнала показана на рис. 2.

Рис. 2. Пилообразная форма сигнала, формируемого таймером NE555



Проблема частотных провалов и их влияние на эффективность помех

В инженерной практике традиционные методы периодического частотного сканирования широко подвержены явлению частотных провалов (Frequency Gap), которое характеризуется следующими типичными признаками:

ширина провала: от нескольких кГц до десятков кГц

положение провала: относительно фиксированное, с медленным дрейфом

периодичность провалов: тесно связана с периодом частотного сканирования

Для беспилотных летательных аппаратов и систем связи LoRa, обладающих интеллектуальными механизмами оценки канала, приёмная сторона, как правило, в реальном времени отслеживает отношение сигнал/шум (SNR) и коэффициент битовых ошибок (BER) на отдельных частотных точках. При обнаружении частоты, на которой качество связи существенно превосходит остальные участки спектра, система может автоматически выбрать либо зафиксировать данный частотный канал для передачи данных.

В результате даже при визуально кажущемся «полном частотном покрытии» спектра целевая система способна обеспечить устойчивую связь за счёт фиксации в зоне частотного провала, что приводит к существенному снижению эффективности помех.

5. Усовершенствованный метод управления VCO на основе псевдослучайных кодов

Для устранения присущих периодическому сканированию ограничений был введён метод управления VCO на основе псевдослучайных кодов (идей, заимствованных из принципов LoRa).

Ключевая цель данного подхода заключается в нарушении периодичности управляющего напряжения и процесса частотного сканирования, что позволяет придать частотным провалам высокую степень случайности и непредсказуемости.

5.1 Формирование управляющего сигнала

В усовершенствованной схеме внутри MCU с использованием псевдослучайных алгоритмов (таких как LFSR, возмущение начального зерна генератора случайных чисел и т.п.) формируется цифровая последовательность со случайно изменяющимися значениями. Данная последовательность после преобразования с помощью DAC либо посредством PWM с последующей низкочастотной фильтрацией преобразуется в непрерывно изменяющееся аналоговое управляющее напряжение, которое подаётся на вход настройки V_T генератора VCO.

Принципиальная структурная схема данного метода показана на рис. 3.

Рис. 3. Принцип работы модуля помех с управлением VCO на основе псевдослучайных кодов (LoRa)

Данный управляющий сигнал обладает следующими характеристиками:

случайное изменение амплитуды напряжения

случайное изменение времени удержания напряжения

отсутствие фиксированной периодичности

покрытие всего диапазона настройки при статистическом усреднении во времени

5.2 Принцип работы системы

При псевдослучайном управлении выходная частота VCO демонстрирует нелинейный и непериодический характер скачкообразных изменений. По сравнению с традиционным методом частотного сканирования спектральное представление такого сигнала характеризуется следующими особенностями:

более дискретное распределение энергии по спектру

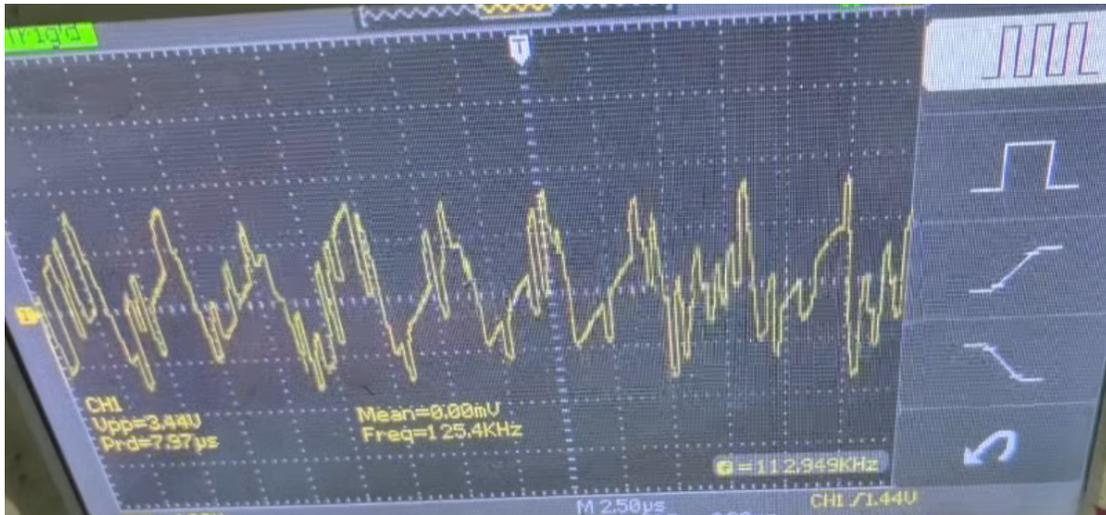
непредсказуемое время удержания на отдельных частотных точках

непрерывное изменение положения частотных провалов

Тем самым одновременно по временной и частотной осям существенно возрастает неопределённость приёма для целевой системы.

С выхода MCU псевдослучайный управляющий сигнал подаётся на вход настройки V_T генератора VCO; соответствующая форма сигнала показана на рис. 4.

Рис. 4. Форма псевдослучайного управляющего сигнала



6. Анализ эффективности помех и преимуществ в условиях противодействия

Несмотря на то, что на физическом уровне VCO в силу своих характеристик настройки не позволяет полностью исключить мгновенные частотные провалы, при использовании псевдослучайного управления данные провалы обладают следующими существенными улучшениями:

быстрое изменение положения частотных провалов

случайные колебания ширины провалов

крайне малая продолжительность существования провалов

невозможность их долговременной фиксации

Для беспилотных летательных аппаратов и систем связи LoRa даже в случае кратковременного обнаружения «относительно чистой» частотной точки данное состояние сохраняется лишь в течение крайне короткого времени, после чего приводит к следующим последствиям:

срыву синхронизации канала связи

увеличению количества повторных передач

отказу адаптивных алгоритмов

существенному снижению стабильности связи

С точки зрения системного противодействия данный подход эффективно повышает способность системы помех к подавлению интеллектуальных целей связи.

7. Заключение

В данной работе был проведён системный анализ принципов функционирования традиционного метода сканирующих помех на основе управления VCO с помощью таймера NE555, а также рассмотрены его ограничения в условиях интеллектуальных систем связи. Основное внимание было уделено усовершенствованному методу управления VCO на основе псевдослучайных кодов (идей, заимствованных из принципов LoRa).

Введение механизма случайного управления позволяет придать выходному спектру VCO высокую степень непредсказуемости, эффективно предотвращая использование фиксированных частотных провалов целевыми системами. В результате существенно повышается надёжность подавления и инженерная практическая ценность решения при воздействии на системы связи LoRa и каналы управления беспилотных летательных аппаратов.

С точки зрения реализации предложенный подход отличается чёткой структурой, высокой масштабируемостью, а также простотой интеграции с цифровыми системами управления, что делает его перспективным для проектирования и применения в системах радиоэлектронного противодействия нового поколения.