

Análisis Detallado del Firmware: Línea de Comandos IEEE 802.15.4

Laura Daniela Alarcón Castaño (Autor del Proyecto)

Plataforma: ESP32-C6 (ESP-IDF v5.5)

Archivo Principal: `esp_ieee802154_cli.c`

Índice

1. Introducción y Contexto del Proyecto	3
2. Arquitectura de Software y Componentes	3
2.1. Plataforma y SDK	3
2.2. Componentes Clave y Dependencias	3
3. Análisis del Protocolo IEEE 802.15.4	3
3.1. Capa Física (PHY)	3
3.2. Mecanismos de Control	3
4. Análisis del Código Fuente: esp_ieee802154_cli.c	4
4.1. Flujo de Ejecución Principal (app_main)	4
4.2. Inicialización de la Consola	4
5. Comandos Críticos de la CLI y Uso	4
5.1. Comandos de Configuración	4
5.2. Comandos de Transmisión y Diagnóstico	5
6. Conclusiones	5

1. Introducción y Contexto del Proyecto

Este proyecto demuestra el uso del estándar de comunicación inalámbrica **IEEE 802.15.4** en el microcontrolador **ESP32-C6** a través de una **Interfaz de Línea de Comandos (CLI)**.

El objetivo es exponer las funciones de configuración y diagnóstico de la capa física y MAC a través de una consola interactiva, permitiendo al usuario:

1. Configurar dinámicamente parámetros de red (PAN ID, Canal, Dirección).
2. Enviar y recibir paquetes de prueba (TX/RX).
3. Realizar evaluaciones de canal (CCA) y mediciones de energía (ED).

2. Arquitectura de Software y Componentes

2.1. Plataforma y SDK

- **Target del Chip:** esp32c6.
- **Framework:** ESP-IDF versión 5.5.0.

2.2. Componentes Clave y Dependencias

El proyecto se basa en el sistema de componentes modular de ESP-IDF, tal como se define en `CMakeLists.txt` e `idf_component.yml`.

Cuadro 1: Dependencias Clave del Firmware (Extraído de `CMakeLists.txt`)

Componente	Propósito en el Proyecto
ieee802154	Implementación del protocolo 802.15.4 de Espressif.
console	Provee el *Read-Eval-Print Loop* (REPL) interactivo.
nvs_flash	Inicialización del almacenamiento no volátil.
cmd_ieee802154	Registra los comandos específicos de 802.15.4 en la CLI.
cmd_system	Registra comandos generales del sistema (ej. <code>restart</code> , <code>heap</code>).

3. Análisis del Protocolo IEEE 802.15.4

El estándar **IEEE 802.15.4** define la capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de datos (LR-WPANs). Es el cimiento de protocolos de alto nivel como Zigbee, Thread y algunos modos de Bluetooth.

3.1. Capa Física (PHY)

La PHY define la modulación, los canales y las características de radio. El ESP32-C6 incluye un transceptor dedicado de 2.4 GHz compatible con 802.15.4.

3.2. Mecanismos de Control

Dos funciones críticas probadas por la CLI son:

- **Energy Detect (ED):** Medición de la energía presente en un canal durante un período de tiempo, útil para evaluar el ruido o la ocupación.

- **Clear Channel Assessment (CCA):** Mecanismo utilizado antes de transmitir para asegurar que el canal está libre, minimizando colisiones y crucial para la eficiencia de la red.

4. Análisis del Código Fuente: esp_ieee802154_cli.c

4.1. Flujo de Ejecución Principal (app_main)

La función de entrada del sistema orquesta la secuencia de inicialización en el siguiente orden:

```

1 void app_main(void)
2 {
3     // 1. Inicializa NVS para guardar configuraci n persistente.
4     initialize_nvs();
5
6     // 2. Habilita el driver 802.15.4 en la radio del chip.
7     esp_ieee802154_enable();
8
9     // 3. Inicializa el entorno de la consola (UART)
10    // para procesar la entrada de comandos del usuario.
11    initialize_console();
12
13    // 4. Inicia el Read-Eval-Print Loop (REPL).
14    esp_console_start_repl(repl);
15 }

```

Listing 1: Flujo Simplificado de `app_main`

4.2. Inicialización de la Consola

El código configura el entorno de la consola (`esp_console`) para usarla UART, lo que permite la interacción a través de la consola.

Prompt: El indicador de comando se define como `ieee802154`", facilitando la identificación del entorno: `ieee802154>`.

Registro de Comandos: Los módulos `ieee802154_cmd.h` y `cmd_system.h` son importados para registrar todas las funciones de control disponibles en la consola.

5. Comandos Críticos de la CLI y Uso

Los comandos habilitados a través de la CLI permiten la interacción directa con el stack 802.15.4.

5.1. Comandos de Configuración

Cuadro 2: Comandos de Configuración de Red

Comando (Ejemplo)	Módulo	Función y Uso
<code>ieee802154 set_pan_id 0xABCD</code>	<code>ieee802154_cmd</code>	Define el Identificador de Red de Área Personal (PAN ID).
<code>ieee802154 set_channel 11</code>	<code>ieee802154_cmd</code>	Selecciona el canal de radio (11-26 en 2.4 GHz).

Cuadro 2: Comandos de Configuración de Red

Comando (Ejemplo)	Módulo	Función y Uso
<code>ieee802154 set_addr 0x0001</code>	<code>ieee802154_cmd</code>	Establece la dirección corta del dispositivo.

5.2. Comandos de Transmisión y Diagnóstico

Cuadro 3: Comandos de Operación y Diagnóstico

Comando (Ejemplo)	Propósito	Resultado y Aplicación
<code>ieee802154 tx 0x0002 "Hola"</code>	Transmisión de un paquete corto.	Envía el mensaje "Hola. ^a la dirección 0x0002. Fundamental para la verificación de la capa física.
<code>ieee802154 ed 5 1</code>	Detección de energía (ED).	Mide el nivel de ruido en el canal (5) durante un intervalo (1 segundo), validando la función de diagnóstico de capa física.
<code>ieee802154 start_rx</code>	Habilita el modo receptor.	Pone el chip en escucha continua para recibir paquetes de prueba.

6. Conclusiones

Este firmware de CLI convierte el ESP32-C6 en una herramienta de diagnóstico y desarrollo para redes 802.15.4. La capacidad de configurar y probar la capa física y MAC mediante comandos interactivos valida la versatilidad del chip para aplicaciones de bajo consumo, como redes malladas (Mesh), Zigbee o Thread, donde el control directo de la radio es esencial.