

Knoopcel-schakelaar met ESP32-C2

prestatiegericht ontwerpen

Li Junru en Zhang Wei, Espressif

De ESP32-C2-gebaseerde knoopcel-schakelaar is een toepassing voor de smart home-markt. Hij biedt directe communicatie met systemen die zijn uitgerust met ESP, stabiele bidirectionele communicatie, compacte afmetingen en een batterij-levensduur tot vijf jaar. Dit artikel behandelt de software- en hardware-implementatie en laat de voordelen zien voor moderne smart homes en IoT-toepassingen.



Figuur 1. De op de ESP32-C2 gebaseerde knoopcel-schakelaar in zijn behuizing.

Met de snelle ontwikkeling van de smart home-markt is er een toenemende vraag naar efficiënte draadloze schakelaars met een laag stroomverbruik. Dit artikel presenteert een baanbrekende toepassing, een ESP32-C2-gebaseerde knoopcel-schakelaar (**figuur 1**), gericht op het aanpakken van problemen zoals een vertraagde responsie en de noodzaak van extra gateways, waar andere draadloze schakeloplossingen op basis van technologieën als Bluetooth LE en ZigBee vaak mee te maken hebben.

De ESP32-C2-gebaseerde knoopcel-schakelaar heeft verschillende voordelen ten opzichte van andere draadloze schakelaar-varianten:

- rechtstreekse communicatie met slimme lampen of wandschakelaars die zijn uitgerust met ESP-chips, zodat er geen

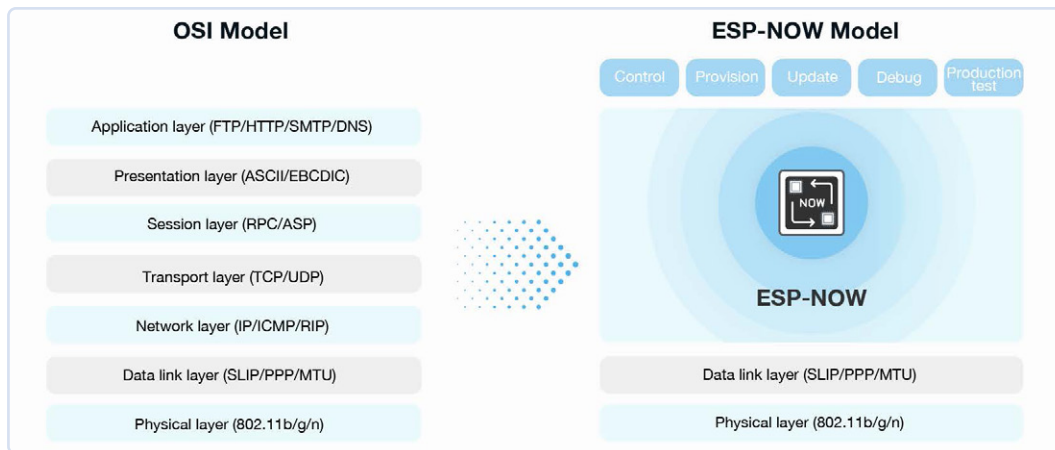
extra gateway nodig is;

- stabiele tweerichtingscommunicatie met een hoge betrouwbaarheid van de WiFi packet-transmissie;
- de schakelaar met knoopcel-voeding heeft minimale afmetingen en ondersteunt veelzijdige productvormen zoals zelfklevende schakelaars, schakelaars met meerdere toetsen, aanraakschakelaars en draaischakelaars;
- de ESP32-C2 is volledig uitgeschakeld als hij niet wordt gebruikt, waardoor een enkele CR2032-knoopcel tot 5 jaar meegaat (uitgaande van een gebruik van 10 keer per dag).

In dit artikel gaan we dieper in op de uitgebreide toepassingsmogelijkheden van de ESP knoopcel-schakelaar en laten we zien hoe

goed deze voldoet aan de eisen van moderne smart home-technologie.

Knoopcel-batterijen, zoals de veelgebruikte CR2032, zijn een populaire energiebron voor IoT-apparaten. Knoopcel-batterijen staan bekend om hun compacte ontwerp en lichte gewicht en zijn zeer geschikt voor kleine elektronische apparaten, zonder dat die veel groter of zwaarder worden. Door hun relatief hoge energiedichtheid kunnen ze meer energie opslaan in een kleiner volume, wat resulteert in een langere gebruiksduur. Bovendien vertonen knoopcellen een langzamere zelfontlading, wat betekent dat ze hun lading behouden, zelfs als ze langere tijd niet gebruikt worden. Knoopcel-batterijen leveren een relatief stabiele spanning tijdens het ontladen en spelen daarom een essentiële rol in de normale werking van apparaten.



Figuur 2. Het ESP-NOW model combineert de bovenste vijf lagen van een OSI-model tot één laag.

Door hun ontwerp leveren ze echter meestal een kleinere stroom, waardoor ze ongeschikt zijn voor apparaten met een groot vermogen. In de diverse toepassingsgebieden worden WiFi IoT-apparaten op grote schaal gebruikt, waarbij ze profiteren van de grootschalige dekking van WiFi-netwerken. Doordat traditionele bekabelde verbindingen tussen apparaten niet meer nodig zijn, maakt WiFi-technologie een flexibelere en handigere inzet en beheer van IoT-apparaten mogelijk. Bovendien ondersteunt WiFi-technologie gelijktijdige verbindingen met meerdere apparaten, waardoor het bijzonder waardevol is voor IoT-scenario's met veel onderling verbonden apparaten. De markt biedt een overvloed aan apparaten en componenten die WiFi ondersteunen, waardoor de ontwikkelings- en productiekosten van IoT-apparaten aanzienlijk worden verlaagd. Toch is het belangrijk om te bedenken dat WiFi-apparaten relatief meer energie verbruiken dan andere low-power draadloze technologieën. Daarom zijn bepaalde IoT-apparaten die afhankelijk zijn van batterijen soms minder geschikt voor WiFi. De ESP32-C2 heeft bijvoorbeeld een maximaal stroomverbruik van 370 mA bij het zenden en maximaal 65 mA bij ontvangst tijdens RF-bedrijf.

De verbruikskarakteristieken van WiFi-apparaten vormen twee grote uitdagingen voor low-power toepassingen. Aan de ene kant maakt de aanzienlijke stroom bij het ontvangen het moeilijk voor de chip om continu in ontvangstmodus te werken. Aan de andere kant kan de plotselinge hoge stroom tijdens het verzenden van packets de stabiliteit van de voedingsspanning voor de chip beïnvloeden, wat kan leiden tot een chip-reset. In dit artikel presenteren we een knooppcel-schakelaar gebaseerd op de ESP32-C2 die deze uitdagingen aanpakt door gebruik te maken van een weloverwogen combinatie van software en hardware, wat resulteert in een indrukwekkende levensduur van de batterij.

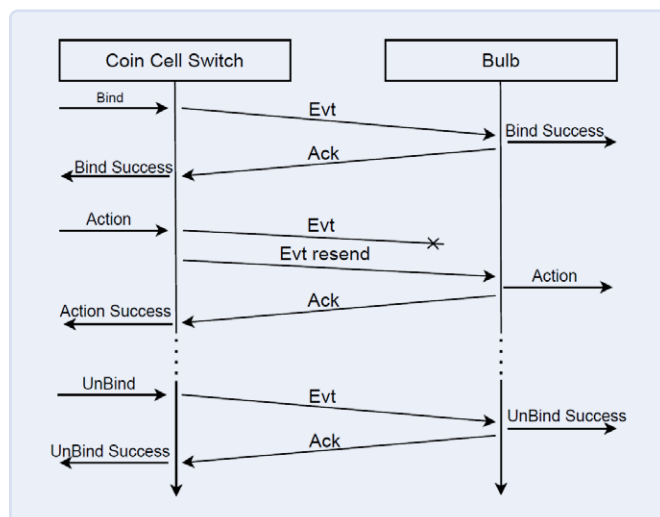
Het artikel is verdeeld in drie secties. Ten eerste gaan we in op de software-implementatie, waarbij we gedetailleerd inzicht geven in de methodologie van het programma en de resultaten die daaruit voortvloeien. Ten tweede onderzoeken we de hardware-implementatie, waarbij we richtlijnen geven voor de keuze van onderdelen. Tenslotte evalueren we in het experimentele gedeelte de werkelijke energieprestaties en de *packet latency* van het apparaat, zodat de lezer deze toepassing goed kan beoordelen.

Ontwerp van het programma

Keuze van de protocollaag: de eerste cruciale beslissing was het kiezen van de juiste protocollaag. Normaal gesproken werkt WiFi in een 'connected' modus, waarbij apparaten een constante verbinding met het netwerk onderhouden, tenzij ze opzettelijk worden losgekoppeld of buiten bereik zijn. Deze continue verbinding zorgt ervoor dat apparaten direct beschikbaar zijn voor communicatie zonder dat ze telkens opnieuw verbinding moeten maken. Het instandhouden van deze verbinding kost echter veel energie. Om deze uitdaging aan te gaan, hebben we

gekozen voor een lichtere communicatie-oplossing. In de software hebben we dit bereikt door berichten uit te zenden op de datalink-laag, zodat de ontvangende apparaten de informatie gemakkelijk kunnen ophalen en doorsturen. Daarnaast implementeerden we een vooraf ingestelde ontvangsttijd om het stroomverbruik zo laag mogelijk te houden. Voor dit doel bleek het ESP-NOW protocol, ontwikkeld door Espressif Systems, ideaal. ESP-NOW is een draadloos communicatie-protocol gebaseerd op de datalink-laag. Het vereenvoudigt de bovenste vijf lagen van het OSI-model tot één laag (figuur 2).

Apparaten worden geïdentificeerd door een uniek MAC-adres, waardoor het niet meer nodig is om gegevens achtereenvolgens door complexe lagen te sturen, zoals de netwerklaag, transportlaag, sessielaag, presentatielaag en toepassingslaag. Het elimineert ook de noodzaak om headers toe te voegen en te verwijderen op elke laag, waardoor vertragingen door netwerkcongestie en vertragingen door het verlies van packets sterk worden gereduceerd, wat resulteert in hogere reactiesnelheden. Bovendien kan ESP-NOW naast WiFi en Bluetooth LE bestaan en ondersteunt



Figuur 3. Het bevestigingsmechanisme geïmplementeerd in de applicatielaag.

Tabel 1. Energieverbruik vóór optimalisatie van het initialisatieproces.

Actie	Duur (ms)	Gemiddeld vermogen (mW)	Energieverbruik (mJ)
Boot	364,7	58	21,16
Wi-Fi Init	115,2	69,8	8,03
Wi-Fi Start	56,6	303,9	17,2

Tabel 2: Energieverbruik na optimalisatie van het initialisatieproces.

Actie	Duur (ms)	Gemiddeld vermogen (mW)	Energieverbruik (mJ)
Boot	37,52	53,14	2,0
Wi-Fi Init	6,55	72,62	0,48
Wi-Fi Start	19,12	164,0	3,13

het meerdere SoC-series van Espressif met WiFi-functionaliteit.

Workflow: om een betrouwbare communicatie te garanderen, hebben we een bevestigingsmechanisme geïmplementeerd in de applicatielaag (**figuur 3**). Het communicatieproces begint met de knoopcel-schakelaar die de communicatie tot stand brengt. Na ontvangst van een bericht antwoordt de ontvangende kant met een bevestiging (ACK), waarmee de succesvolle ontvangst van het bericht wordt aangegeven en de communicatie wordt afgesloten. Als de bevestiging niet binnen een bepaalde time out-periode wordt ontvangen, probeert de switch het bericht nog enkele keren opnieuw te verzenden. Om een gestroomlijnd protocol te behouden, worden alle packets verzonden met behulp van het ESP-NOW protocol in de datalink-laag. Het verbinden en loskoppelen van apparaten wordt bereikt door bidirectionele MAC-adresverificatie, waardoor de veiligheid en de eenvoud van het protocolontwerp worden gewaarborgd.

Kanaalwissel-strategie: de kanalen voor ontvangen en verzenden van het ESP-NOW protocol volgen het kanaal van het op dat moment verbonden AP (Access Point) van het apparaat. De knoopcel-schakelaar kan alleen communiceren met het aangestuurde apparaat als ze zich op hetzelfde kanaal bevinden. Als het aangestuurde apparaat al verbonden is met het gespecificeerde WiFi AP, volgt diens operationele kanaal veranderingen in het kanaal van het AP. De knoopcel-schakelaar moet het huidige operationele kanaal van het aangestuurde station bepalen. In een omgeving waar de omringende netwerksituatie relatief stabiel is, verandert het kanaal van het AP niet vaak.

Daarom zendt het apparaat eerst op het kanaal waar het de laatste keer met succes gegevens heeft verstuurd. Als meerdere verzendpogingen mislukken en er wordt vastgesteld dat het ontvangststation is overgeschakeld op een nieuw operationeel kanaal, dan worden alle resterende WiFi-kanalen doorlopen.

Stroommodulatie bij packet-transmissie:

tijdens het verzenden van WiFi-packets kan de momentane stroom meer dan 300 mA bedragen, veel meer dan de maximale stroom die knoopcel-batterijen kunnen leveren. Om dit probleem te ondervangen, hebben we een intermitterende packet-transmissie strategie toegepast. Telkens na het verzenden van een packet wordt een bepaald interval ingelast, waarin de chip in een light sleep-modus gaat. In deze toestand verbruikt de chip een stroom van slechts enkele tientallen microampère en wordt de ontlading van de knoopcelbatterij voornamelijk gebruikt om de condensatoren op te laden voor het verzenden van het volgende packet.

Laten we aannemen dat de gemiddelde stroom tijdens de pakketoverdracht I_0 is, met een duur van t_0 , en de gemiddelde stroom in de sleep-modus I_1 is, met een duur van t_1 . De totale gemiddelde stroom tijdens de packet-transmissie kan dan worden berekend volgens de formule:

$$I = \frac{I_0 t_0 + I_1 t_1}{t_0 + t_1}$$

Door de timing van I_0 en I_1 zorgvuldig te moduleren, kunnen we ervoor zorgen dat de gemiddelde stroom onder de veilige uitgangsstroom van de knoopcel blijft. Deze strategie helpt om een efficiëntere en energiebesparende werking van de knoopcel-schakelaar te bereiken.

rende werking van de knoopcel-schakelaar te bereiken.

Optimalisatie van het initialisatieproces: het initialisatieproces van een WiFi-chip bestaat uit verschillende fasen, van het opstarten tot de voltooiing van de signaaloverdracht. We voerden een grondige analyse uit van elke fase en de duur daarvan. Standaard omvat het opstarten van de chip de boot-, WiFi-initialisatie- en WiFi-startprocessen. Van deze processen neemt de boot-initialisatie de meeste tijd in beslag en resulteert het WiFi-startproces in een piek in het stroomverbruik gedurende korte tijd. Om het stroomverbruik te verminderen, hebben we de volgende optimalisaties doorgevoerd:

1. **Niet-essentiële logging uitschakelen:** we hebben onnodige uitvoer van log-data uitgeschakeld om het stroomverbruik tijdens het opstartproces te minimaliseren.
2. **Flash-verificatie:** we hebben flash-verificatie uitgeschakeld, omdat het niet essentieel was voor de werking van de applicatie.
3. **WiFi kalibratie-info:** om te voorkomen dat WiFi vaak gekalibreerd moet worden, hebben we de WiFi kalibratie-info opgeslagen in niet-vluchtig geheugen.

Werp eens een blik op **tabel 1** en **tabel 2**. Door het implementeren van deze optimalisaties is het gelukt om het totale energieverbruik (Boot + Wi-Fi Init + Wi-Fi Start) tijdens het initialisatieproces te verlagen van 46,39 mJ naar 5,61 mJ. Bovendien daalde de initialisatietijd van 536,5 ms naar 63,19 ms. Raadpleeg voor meer gedetailleerde configuratie-informatie de ESP-NOW coin_cell_demo [1].

Ontwerp van de schakeling

De ESP32-C2 heeft een werkspanning van 3,3 V nodig, wat hoger is dan de spanning die de knoopcel levert. Daarom moet er een boost-schakeling worden ontworpen om de spanning te verhogen. De stabiliteit van de voeding heeft een directe invloed op de prestaties van de packet-transmissie en de algehele stabiliteit van het apparaat. Een goed



De ESP32-C2 knoopcel-schakelaar biedt een handige en veelzijdige manier om slimme apparaten te bedienen.

ontworpen spanningsregelaar kan de RF-prestaties en de levensduur van de batterij van het apparaat verbeteren. Het is essentieel om bij het ontwerpen van de schakeling om rekening te houden met zowel de productiekosten als de gewenste prestaties.

De boost-converter moet zorgvuldig worden ontworpen om een efficiënte conversie met minimaal vermogensverlies te garanderen. Bovendien moet hij een stabiele en betrouwbare voeding leveren voor de ESP32-C2, zodat deze optimaal kan presteren in zowel de actieve als de slaapmodus. Daarnaast moet het ontwerp rekening houden met factoren zoals stroomverbruik, warmtedissipatie en rendement om de juiste balans te vinden tussen prestaties en stroomverbruik.

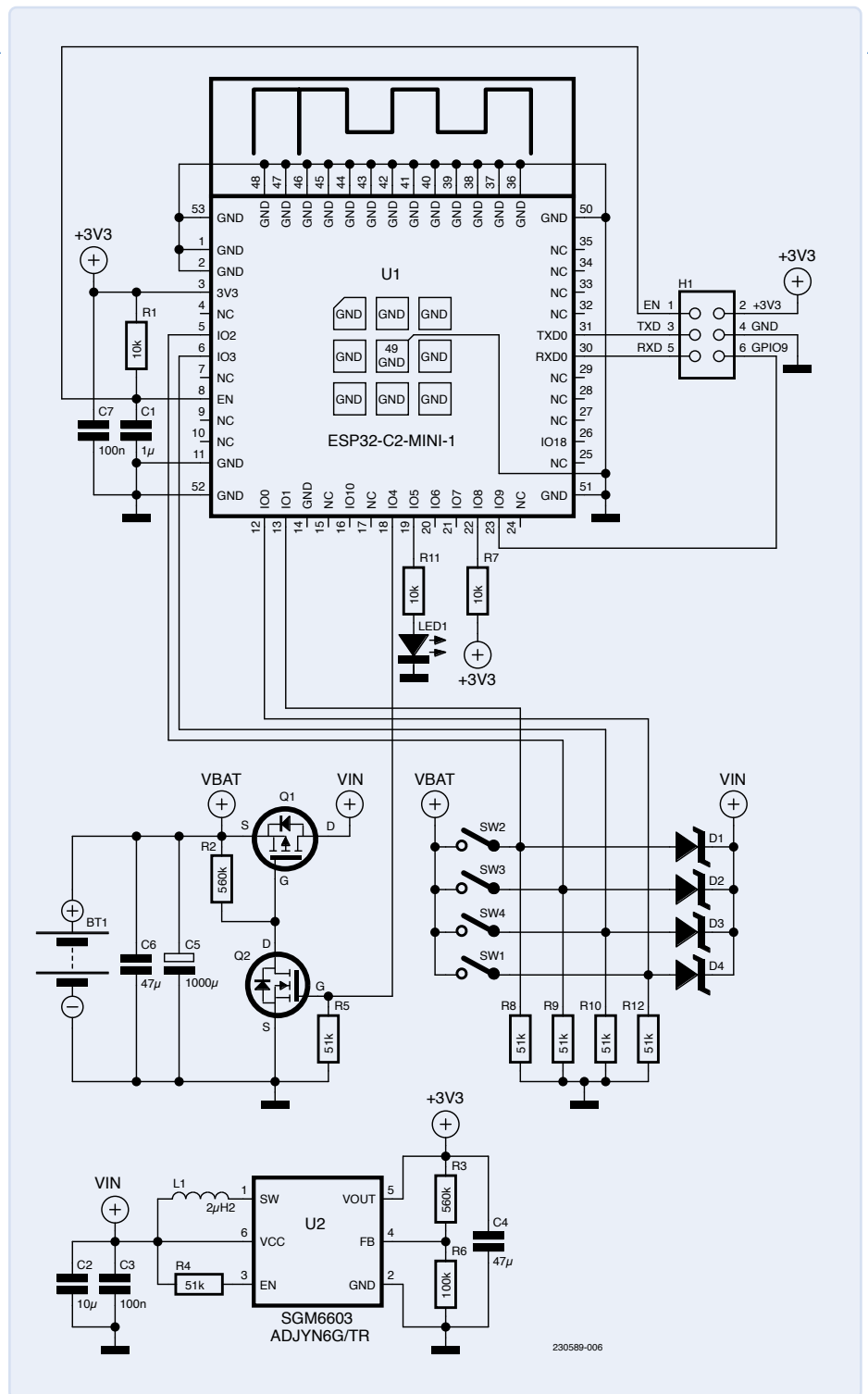
Het algemene doel van het ontwerp is om een robuuste en kosteneffectieve oplossing te realiseren die voldoet aan de voedingseisen van de ESP32-C2 en tegelijkertijd de prestaties van het apparaat en de levensduur van de batterij optimaliseert. Samenwerken met ervaren hardwaretechnici en gebruikmaken van de juiste componenten en technieken kan leiden tot een succesvol ontwerp van de schakeling dat voldoet aan de specifieke behoeften van de WiFi knoopcel-schakelaar.

De schakeling als geheel

Keuze van de converter: de knoopcel-batterij kan worden beschouwd als een spanningsbron met een snel toenemende inwendige weerstand tijdens het ontladen. Aanvankelijk is de inwendige weerstand ongeveer 10 Ω , maar deze kan oplopen tot honderden ohms naarmate hij het einde van de ontladacyclus wordt benaderd. De ESP32-C2 heeft als uitvoerapparaat een voeding nodig die een stroom van 500 mA of meer kan leveren. De voedingsrimpel kan de RF transmissie-prestaties sterk beïnvloeden. Bij het meten van de voedingsrimpel is het cruciaal om deze te testen onder normale packet-transmissie omstandigheden.

De voedingsrimpel kan afhankelijk van de veranderingen in de voedingsmodus variëren. Een groter packet-zendvermogen kan leiden tot grotere rimpel. Om de invloed van de hoge interne weerstand van de knoopcel-batterij te beperken, moet de minimale ingangsspanning van de boost-converter zo laag mogelijk zijn, met behoud van een hoog rendement.

Voor dit ontwerp is, zoals je kunt zien in het algemene schema van **figuur 4**, de SGM6603 gekozen als boost-chip. Deze heeft een



Figuur 4. Schema van de knoopcel-schakelaar.

minimale ingangsspanning van slechts 0,9 V en een maximale schakelstroom van 1,1 A, waardoor hij geschikt is om de spanning van de knoopcel-batterij efficiënt op te voeren om te voldoen aan de voedingseisen van de ESP32-C2.

Keuze van de condensatoren: er zijn twee sets condensatoren die met de voeding te maken hebben – de condensatoren voor en na de boost-converter. De condensatoren

na de boost converter zijn meestal parallel gekoppeld aan de voedingsingang van de WiFi-module en stabiliseren de uitgangsspanning en verminderen de spanningsval tijdens de packet-transmissie. Grotere condensatoren resulteren in een meer geleidelijke spanningsverandering van de voeding van de chip. Aan de andere kant volgt de spanning over deze condensatoren de voedingsspanning van de chip. Wanneer de WiFi-chip wordt



Figuur 5: Oscilloscoop-screenshot van spanning en stroom tijdens de verzending van een standaard datapakket.

gevoed, worden de condensatoren opgeladen en wanneer de chip wordt uitgeschakeld, wordt deze set condensatoren volledig ontladen. Daarom kan het gebruik van te grote condensatoren leiden tot verminderde systeemefficiëntie. Het is essentieel om een balans te vinden tussen de waarde van de condensator en de efficiëntie van het systeem. De condensatoren voor de boost-converter staan parallel aan de batterij. Hun belangrijkste functie is het verminderen van de piekstroom van de batterij. Tijdens een piekstroom-periode werken de condensatoren als de primaire stroombron, terwijl tijdens perioden van lage stroom de batterij de primaire stroombron wordt die de condensatoren oplaadt. Als de boost-converter niet in bedrijf is, wordt het enige stroomverbruik in de schakeling veroorzaakt door de lekstroom van de condensator. Met het oog op de omvang en lekstroom zijn solid-state elektrolytische condensatoren en aluminium elektrolytische condensatoren de ideale keuze. Zo heeft een elektrolytische condensator van 1000 μF meestal een lekstroom van ongeveer 1 μA bij een spanning van 3 V.

Ontwerp geregelde aan/uit-schakelaar: in toepassingen waar de operationele levensduur van het apparaat in jaren wordt gemeten, wordt de stand-by stroom (lekstroom) tijdens sleep modi een belangrijke factor die de totale levensduur van het apparaat beïnvloedt. Om dit probleem aan te pakken, bevat het huidige ontwerp een besturing van de aan/uit-schakelaar die bestaat uit de twee MOSFET's Q1 en

Q2 in het schema van **figuur 4**. Deze schakelaar zorgt ervoor dat de verbinding van de chip met de batterij gemaakt of verbroken kan worden, waardoor de voedingsmodule en RF-module effectief worden losgekoppeld van de batterij als het apparaat niet in gebruik is. Als het apparaat moet worden aangezet, wordt er op een knop gedrukt, waardoor de chip verbonden wordt met de voeding om te worden ingeschakeld. Tegelijkertijd gebruikt de chip ADC-spanningsbemonstering om vast te stellen welke knop is ingedrukt.

Het gebruik van deze geregelde aan/uit-schakelaar zorgt voor efficiënt energiebeheer, waardoor onnodig stroomverbruik tijdens inactieve perioden wordt verminderd en de algehele levensduur van de batterij van het apparaat wordt verlengd. Door de voeding en RF-modules volledig los te koppelen als ze niet worden gebruikt, wordt de stand-by stroom van het apparaat geminimaliseerd, waardoor de levensduur en bruikbaarheid in verschillende elektronische toepassingen voor consumenten worden geoptimaliseerd. Naast de bovengenoemde componenten bevat de schakeling ook een minimaal ESP32-C2 systeem en een LED-indicator.

Evaluatie batterij-levensduur

Na de laatste optimalisaties werd een typische packet-transmissie geanalyseerd en werden de spanning en stroom aan de ingangszijde van de boost-converter vastgelegd (**figuur 5**). Op basis van de verkregen informatie bedraagt de volledige packet-transmissietijd voor het

apparaat 240 ms en de gemiddelde stroom tijdens bedrijf 25,8 mA..

Om de levensduur van de batterij van het apparaat nauwkeurig te kunnen inschatten, rekening houdend met de onzekerheid in de efficiëntie van de boost-converter onder dynamische belasting, werd een praktische evaluatie uitgevoerd. Bij deze evaluatie werd het totale aantal verzonden packets van het apparaat getest in de gespecificeerde werkmodus. Elke cyclus werd gemeten vanaf het moment dat het apparaat werd geactiveerd (knop ingedrukt) tot de succesvolle transmissie van een signaal en de ontvangst van een bevestiging – dat omvat een complete activiteitscyclus.

Na het testen bleek dat een enkele CR2032 knoopcel-batterij ongeveer 65.000 transmissiecycli kon ondersteunen. Bovendien werd een stand-by stroom van het apparaat gemeten van slechts 1 μA . Ervan uitgaande dat het apparaat 10 keer per dag pakketten verzendt, bedraagt de praktische levensduur van de CR2032-knoopcel dus ongeveer 5 jaar. Deze evaluatie bewijst het efficiënt energiebeheer en het lage verbruik van het apparaat, waardoor het geschikt is voor langdurig gebruik in elektronische toepassingen voor consumenten. Met de geoptimaliseerde voedingsregeling en het geavanceerde ontwerp van de schakeling bereikt het apparaat een indrukwekkende batterijlevensduur, waardoor een betrouwbare en langdurige werking in diverse IoT- en smart home-toepassingen wordt gegarandeerd.

Slotopmerkingen

De ESP32-C2 knooppcel-schakelaar biedt een handige en veelzijdige manier om slimme apparaten te bedienen. Door gebruik te maken van het flexibele energiebeheer en de protocollen van de ESP32-C2, realiseert deze oplossing een knooppcel-schakelaar op basis van het WiFi-protocol, waardoor eenvoudige communicatie mogelijk is met andere apparaten die

zijn uitgerust met ESP-chips. Als onderdeel van onze toekomstige plannen willen we deze technologie integreren in Matter (voorheen bekend als Project CHIP) standaarden, waardoor flexibele besturing van meerdere apparaten en samenwerking met conventionele apparaten met voeding mogelijk wordt. Vergeet niet om de GitHub-repository [2] van Espressif te bekijken voor meer open-source

demo's en informatie over ESP-IoT-Solution en ESP-NOW.

De knooppcel-schakelaar applicatie verbetert het gemak en de efficiëntie op het gebied van smart homes en IoT. Dankzij het geoptimaliseerde ontwerp en efficiënte energiebeheer gaat de batterij lang mee, waardoor gebruikers slimme apparaten betrouwbaar en duurzaam kunnen bedienen. ◀

230589-03 (vertaling: Hans Adams)



Over de auteurs

Zhang Wei is momenteel een senior staff application engineer bij Espressif Systems. Hij is een doorgewinterde software-engineer met meer dan twintig jaar ervaring in embedded systemen, draadloze netwerken en IoT-ontwikkeling en houdt ervan om eenvoudige oplossingen te vinden voor complexe problemen. Hij heeft een bachelor-diploma in elektrotechniek en computertechniek en een master-diploma in kennistechiek van de National University of Singapore en heeft zijn expertise verrijkt via functies bij technische bedrijven als STMicroelectronics, Greenwave Systems en dormakaba digital. Buiten zijn werk houdt Zhang Wei van voetbal en reizen.



Li Junru werkt als AE engineer bij Espressif Shanghai. Embedded systemen zijn altijd zijn passie geweest. Hij is op een missie om enthousiastelingen te helpen hun creativiteit te ontplooiën met ESP32. Li Junru's inspirerende boodschap: "Laten we samenwerken en samen embedded systeemontwikkeling boeiend maken!"

WEBLINKS

- [1] ESP Now coin_cell_demo (GitHub): <https://tinyurl.com/espnowcoincell>
- [2] GitHub-repository van Espressif: <https://github.com/orgs/espressif/repositories>

Vragen of opmerkingen?

Hebt u vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via zhang.wei@espressif.com of lijunru@espressif.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Gerelateerde producten

- **Espressif ESP32 range**
www.elektor.nl/espressif
- **Getting Started with ESPHome**
www.elektor.nl/19738



ESP-ADF

Espressif Audio Development Framework

Als u een apparaat bouwt waarmee u audio moet opnemen of afspelen, dan is ESP-ADF (Audio Development Framework) de SDK waar u moet kijken. ESP-ADF biedt niet alleen basisondersteuning voor audio-pipelining, maar ook verschillende audio-encoders, -decoders, audiocontainer-parsers, equalizers en downmixers.

Daarnaast worden verschillende high-level protocollen ondersteund, zoals DLNA, RTSP, RTCP en Bluetooth A2DP playback, inclusief de bijbehorende voorbeelden. Er zijn verschillende development kits die audio-ondersteuning bieden. Bekijk de boards uit de ESP32-S3-Korvo- en ESP32-Lyra-serie die prototyping gemakkelijker maken.

<https://github.com/espressif/esp-adf>

