

**FUNKCIONALNO TESTIRANJE WIFI HALOW™ MAC SOFTVER STEKA KORISTEĆI VIRTUAL SYSTEM PLATFORM****FUNCTIONAL TESTING OF WIFI HALOW™ MAC SOFTWARE STACK IN SYSTEM CONTEXT USING VIRTUAL SYSTEM PLATFORM**Vladislav Pejić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratka sadržaj** – Cilj rada jeste da predstavi okruženje i testove korišćene za funkcionalno testiranje Wi-Fi HaLow™ softer steka koristeći alat pod nazivom Virtual System Platform (VSP).

**Gljučne reči:** *WiFi HaLow™, IEEE 802.11ah, VSP, MAC*

**Abstract** – *Goal of this paper is to introduce environment and tests used for functional testing of Wi-Fi HaLow™ software stack using Virtual System Platform (VSP).*

**Keywords:** *WiFi HaLow™, IEEE 802.11ah, VSP, MAC*

**1. UVOD**

IEEE 802.11 WLAN (Wireless Local Area Network) je jedna od najpopularnijih bežičnih tehnologija. Ona koristi 2.4GHz i 5GHz frekvencijske opsege i ima dobru brzinu prenosa podataka, lako se postavlja i jeftina je. Međutim, korišćenje visoke frekvencije ograničava domet bežične mreže. Pored ograničenog dometa, prekomerna upotreba je dovela do zasićenja. Povećanjem broja uređaja koji koriste iste frekvencije dovedeće do još većeg zasićenja mreže [1].

Naša želja za automatizacijom zahtevaće dosta uređaja koji će trebati da budu povezani. Ovi pametni uređaji (senzori, roboti, kontroleri), povezani međusobno, čine mrežu zvanu Internet of Things (IoT). Najlakši i najjeftiniji način povezivanja toliko uređaja je pomoću neke od bežičnih tehnologija. Kako bi se ovi uređaji međusobno povezali, neophodno je da mreža poseduje veliki domet, dobru brzinu prenosa podataka, može da poveže veliki broj stanica, ali i da ima malu potrošnju energije zbog baterijski napajanih uređaja. IEEE 802.11ah, poznat kao i Wi-Fi HaLow™, poseduje sve ove karakteristike.

Ovaj rad opisuje okruženje i testove korišćene za testiranje Wi-Fi HaLow™ softer steka pomoću Virtual System Platform alata kompanije Cadence®.

**2. VIRTUAL SYSTEM PLATFORM**

Virtual System Platform je deo Cadence® System Development Suite-a. VSP omogućava razvoj softvera,

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio dr Rastislav Struharik.**

funkcionalnu verifikaciju, analizu sistema i njegovu optimizaciju pre nego što su hardverski moduli u potpunosti razvijeni. Umesto potpuno razvijenih hardverskih modula koriste se virtuelni prototipovi [2].

VSP omogućava upotrebu hardverskih modela, ali i brz i automatizovan način za kreiranje virtuelnih hardverskih modela. Automatizovan generator koda čita IP-XACT ili tekstualni ulaz i kreira TLM (Transaction-Level Modeling) 2.0 template. U VSP-u, biblioteka TLM IP modela je dostupna za korišćenje u virtuelnim prototipovima. Kreirani TLM model je SystemC model i lako ga je modifikovati i prilagoditi sopstvenim potrebama.

VSP poseduje grafičko okruženje koji omogućava softversko i hardversko debugovanje. Okruženje sadrži breakpoint-ove, simulaciju korak po korak, iščitavanje memorije kao i grafičko predstavljanje softverskih i hardverskih signala. Jedna od glavnih osobina VSP alata je istovremeno debugovanje softvera i hardvera.

Prednosti korišćenja virtuelnih hardverskih prototipova je ta da je moguće početi sa razvojem softvera pre završetka RTL ili FPGA modula. Takođe omogućava lakše debugovanje kompleksnih modela koji sadrže hardverske i softverske delove.

Dizajn koji može da se koristi kao ulaz u VSP može biti:

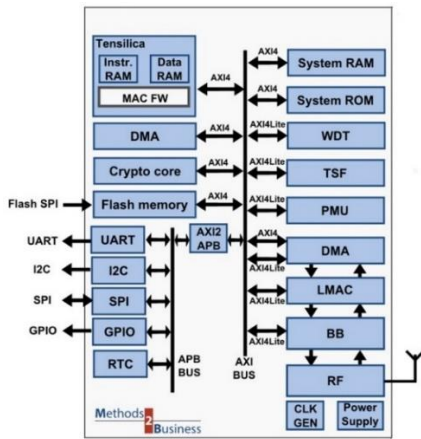
- SystemC TLM 1.0 ili TLM 2.0,
- Legacy RTL: Verilog®, VHDL, ili SystemVerilog,
- C/C++/assembler.

**3. STRUKTURA SISTEMA**

Slika 1. prikazuje celo Wi-Fi HaLow™ SoC (System-On-Chip) rešenje. SoC se sastoji od Wi-Fi HaLow™ MAC sistema, fizičkog sloja i RF radia. Fizički sloj i RF radio nisu bili deo sistema koji se testirao, ali će biti deo finalnog rešenja. Hardverska platforma je ista i za stanicu i za Access Point. Wi-Fi HaLow™ MAC sistem kombinuje hardversko i softversko rešenje. Vremenski kritične funkcije su implementirane u hardveru, a viši protokoli su implementirani u softveru. Hardverska platforma se sastoji od:

- Tensilica® Fusion DSP,
- DMA (Direct Memory Access),
- LMAC (Lower Medium Access Control),

- PMU (The Power Management Unit) i
- Kripto jezgro.



Slika 1. Wi-Fi HaLow™ SoC

Tensilica® Fusion DSP se koristi za pokretanje Wi-Fi HaLow™ MAC softver steka. DSP je dizajniran da optimizuje potrošnju energije i procesorsku moć dok nudi mnogo veću fleksibilnost nego tipični procesor kao što je ARM jezgro.

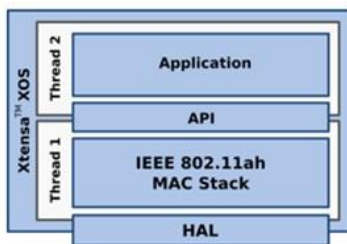
DMA je modul koji se koristi za brzi transfer podataka od i do memorije, bez potrebe za intervencijom procesora.

LMAC predstavlja donji nivo MAC steka. Ovaj modul je implementiran u hardveru i sastoji se od nekoliko manjih modula (kontrolna jedinica, modul za pristup kanalu, modul za agregaciju/deagregaciju, CRC generator). Projektovan je da izvršava funkcionalnosti nižeg nivoa kao što su: kontrola pristupa kanalu, filtriranje paketa, agregacija... Više o ovim funkcijama može se pronaći u [3] i [4].

PMU modul vodi računa o potrošnji energije celog sistema. Ovaj modul uključuje i isključuje delove sistema kako bi se smanjila potrošnja energije. U vreme testiranja, ovaj modul je bio u procesu dizajniranja.

Kripto modul je zadužen za enkripciju i dekripciju paketa. U vreme testiranja, modul nije bio dostupan i Tensilica® DSP je bio zadužen za enkripciju/dekripciju paketa.

Viši protokoli Wi-Fi HaLow™ MAC steka su implementirani u softveru. Xtensa™ XOS je korišćen kao operativni sistem a softver stek je podeljen u dva treda: aplikativni i MAC stek tred (slika 2.). Komunikacija između tredova se obavlja pomoću API funkcija.

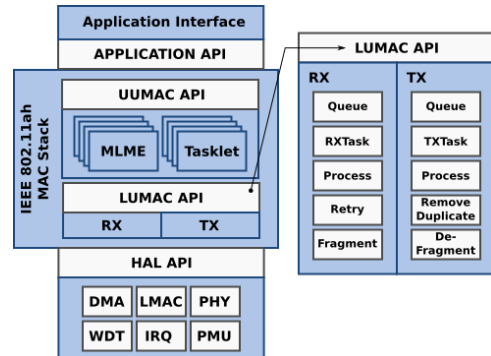


Slika 2. Arhitektura Wi-Fi HaLow™ MAC softver platforme

Stanica i Access Point imaju istu arhitekturu softver steka, ali je implementacija funkcionalnosti drugačija. Koristeći

makro direktive, vrši se izbor za čega će se softver stek koristiti: za stanicu ili Access Point.

MAC softver stek je konstruisan pomoću modularne softverske arhitekture koju je lako proširiti i dodati nove funkcionalnosti. Struktura MAC softver steka je prikazana na slici 3.



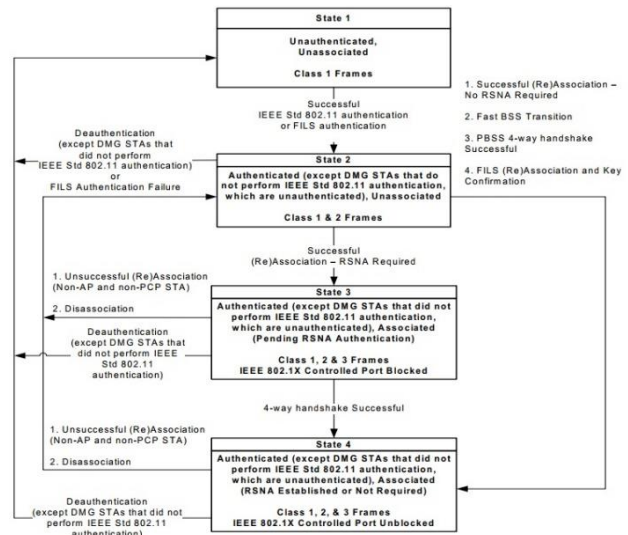
Slika 3. Struktura Wi-Fi HaLow™ MAC softver steka

Wi-Fi HaLow™ MAC softver stek je kompleksan deo softvera. Viši protokoli koji komuniciraju sa višim nivoima u mreži su implementirani u UUMAC (Upper Upper MAC) dok su funkcije koje komuniciraju sa hardverskim delom sistema u nižim nivoima MAC-a (LMAC), implementirane u LUMAC (Lower Upper MAC).

## 4. FUNKCIONALNOSTI KOJE SU TESTIRANE

### 4.1. Konekcija

Da bi stanica mogla da šalje podatke unutar bežične mreže, neophodno je da prvo prođe proces konekcije. Slika 4. prikazuje odnos između stanja stanice tokom konekcije i usluga koje su joj dostupne.



Slika 4. Odnos stanja stanice i dostupnih usluga [3]

Stanica prolazi kroz 3 stanja tokom konekcije:

- Stanje 1 - ovo je inicijalno stanje stanice. Stanica nije ni autentikovana niti asociirana.
- Stanje 2 - stanica je uspešno autentikovana, ali još nije asociirana.

- Stanje 3 - stanica je uspešno autentikovana i asocirana i čeka na 4-way handshake ako Access Point zahteva upotrebu enkripcije. Ako ne zahteva, stanica je uspešno konektovana i prelazi u stanje 4.
- Stanje 4. - stanica je uspešno konektovana.

U svakom od stanja, stanica može da šalje samo odgovarajuće pakete. Postoje 3 klase paketa: klasa 1, klasa 2 i klasa 3. U stanju 1. stanica može da šalje samo pakete klase 1, u stanju 2. pakete klase 1 i 2 i u stanjima 3 i 4 pakete svih klasa.

#### 4.2. Diskonekcija

Ako postoji potreba da se stanica diskonektuje sa Access Point-a, stanica će poslati Deauthentication paket. Posle slanja ovog paketa, stanica se vraća u stanje 1. Access Point može u bilo kom trenutku da diskonektuje konektovanu stanicu na isti način, slanjem Deauthentication paketa.

#### 4.3. Prenos podataka

Prenos podataka unutar bežične mreže je jedna od najvažnijih funkcionalnosti koje će biti testirane. Wi-Fi HaLow™ stanica ili Access Point, mogu da šalju podatke koristeći PV0 ili PV1 QoS Data pakete. Postoje dva tipa PV1 paketa: tip 0 i tip 3. Razlika je u formatu adresa.

#### 4. Intenzivan prenos podataka

Intenzivno slanje podataka je slično regularnom slanju. Podaci se mogu slati pomoću istih paketa kao i kod regularnog slanja. Jedina razlika je što se kod intenzivnog slanja, podaci šalju jedan za drugim, najbrže moguće.

#### 4.5. RTS/CTS mehanizam

RTS (Request to Send)/CTS (Clear to Send) mehanizam se koristi za zaštitu Data paketa namenjenih za slanje. Kada se mehanizam koristi, stanica će poslati RTS paket i čeka odgovor od primaoca RTS i Data paketa. Očekivani odgovor je NDP CTS i ako je primljen stanica će poslati Data paket. Ako NDP CTS nije primljen, stanica će ponovo pokrenuti mehanizam. Da bi se odredilo koji Data paketi treba da budu zaštićeni ovim mehanizmom, koristi se dot11RTSThreshold parametar. Ako je dužina Data paketa veća od vrednosti ovog parametra, koristitiće se RTS/CTS mehanizam. Ako je vrednost ovog parametra jednaka 0, svaki Data paket će biti zaštićen.

#### 4.6. RSNA konekcija

RSNA konekcija je sloj iznad regularne konekcije. Ovaj tip konekcije se koristi kada je uključena enkripcija unutar bežične mreže. RSNA konekciju inicira Access Point nakon uspešne asocijacije.

#### 4.7. Fragmentacija

Fragmentacija je procedura tokom koje se veliki paket deli na više manjih. Koristi kada je potrebno povećati pouzdanost prenosa podataka. Manji paketi imaju veću šansu uspešnog slanja. Defragmentacija je obrnuti proces. Manji paketi se spajaju i originalni paket se rekonstruiše. Da bi se odredilo koji paket treba da se fragmentiše, koristi se dot11FragmentationThreshold. Ako je dužina korisnih informacija koje paket nosi veća od ovog parametra, paket će biti fragmentisan.

#### 4.8. Agregacija

Prilikom svake transmisije u IEEE 802.11 bežičnim mrežama samo se deo transmisionog vremena koristi za prenos korisnih informacija. Ostatak vremena čini prenos raznih zaglavlja, razmak između paketa i potvrda o uspešnom prijemu paketa. Kako bi se povećala efikasnost, koristi se agregacija. Više paketa se spajaju u jedan i tako se šalju. Na prijemnoj strani se takav paket deli na originalne pakete, koji se dalje obrađuju pojedinačno.

#### 4.9. Detekcija duplikata

U bežičnim mrežama javlja se dosta grešaka prilikom slanja i prijema paketa. Zbog ovoga je važno da postoji način da se filtriraju paketi i odbace duplikati. U IEEE 802.11 bežičnim mrežama detekcija duplikata se obavlja na osnovu rednog broja (Sequence Number) i Retry polja (samo za PV0 pakete). Svaki paket sadrži redni broj koji mu dodeljuje pošaljilac. Primaoc čuva najmanje redni broj poslednjeg paketa koji je primio. Kada je paket retransmisija, Retry polje je postavljeno na 1. Na strani primaoca, ako je Retry polje postavljeno na 1, poredi se redni broj primljenog paketa sa rednim brojem poslednjeg primljenog paketa. Ako su jednaki paket se odbacuje kao duplikat. Za PV1 pakete, pošto nemaju Retry polje, redni broj svakog paketa se poredi.

#### 4.10. Kontrola prenosa podataka (Flow control)

Kontrola prenosa podataka (Flow control) je način na koji jedna stanica može da naredi drugoj da joj ne šalje podatke određeni vremenski period, naznačen u naredbi.

#### 4.11. Provera Duration polja

Duration polje je polje unutar MAC zaglavlja PV0 paketa. Ovo polje služi za zaštitu paketa koji slede nakon paketa sa Duration poljem (paketi koji su odgovor na taj paket ili su predviđeni za slanje u istom TXOP-u). Vrednost ovog polja predstavlja vreme nakon prijema paketa sa Duration poljem, tokom kojeg je bežični medijum zauzet.

#### 4.12. PV1 paketi

Jedna od novih karakteristika u Wi-Fi HaLow™ mrežama je nova grupa paketa pod nazivom PV1 paketi. Ovi paketi imaju drugačije MAC zaglavlje nego PV0 paketi koji su do sada korišćeni. Da bi se povećala efikasnost prilikom slanja, MAC zaglavlje ovih paketa je kraće od zaglavlja PV0 paketa. PV1 paketi nemaju Duration polje, format adresa je drugačiji, a takođe nemaju ni Retry polje. Za PV1 pakete ne koristi se RTS/CTS mehanizam.

#### 4.13. Senzorski mod stanice

Stanica u Wi-Fi HaLow™ može da radi u dva moda, senzorski i nesenzorski mod. Senzorska stanica je stanica koja ima sledeće karakteristike:

- Ograničena količina saobraćaja (TXOP = 0, senzorske stanice mogu da pošalju samo jedan paket u TXOP).
- Uređaj sa baterijskim napajanjem.
- Duration polje u PV0 paketima jednak je 0 za senzorske stanice.

#### 4.14. Skeniranje

Stanica koristi skeniranje da provjeri da li postoje Access Point-ovi u njenoj blizini. Postoje dva tipa skeniranja:

- Pasivno skeniranje - stanica osluškuje kanal za S1G Beacon pakete, koje Access Point periodično šalje.
- Aktivno skeniranje - stanica šalje Probe Request i čeka Probe Response od Access Point-a.

### 5. STRUKTURA TESTOVA I OKRUŽENJA

Platforma koja je korišćena za testiranje Wi-Fi HaLow™ MAC softver steka je predstavljena na slici 5. Platforma se sastoji od dva Wi-Fi HaLow™ MAC steka (sadrže model fizičkog sloja) i modela bežičnog medijuma.



Slika 5. VSP platforma korišćena za testiranje

Model bežičnog medijuma ima mogućnost da simulira smetnje u kanalu. Može biti konfigurisan da ošteti određene sekvence paketa, određene pakete, određene sekvence bajtova unutar paketa ili nasumično odabrane pakete. Konfiguracija kanala se vrši pre početka simulacije pomoću TCL skripte, postavljanjem određenih ulaznih signala.

Jedan od zadataka ovog rada je bio razvoj okruženja za automatizovano regresiono testiranje i generisanje izveštaja. Ovo je postignuto pomoću shell skripte i Makefile. Shell skripta je dizajnirana da kreira izveštaj, odredi SVN revizije određenih delova sistema i pozove Makefile. Skripta će generisati dva izveštaja: u jednom će se nalaziti svi pokrenuti testovi, dok u drugom samo oni testovi koji nisu uspešno završeni. Imena regresionih izveštaja će biti sledećeg formata: regression\_report\_log\_yyyymmdd\_serial\_number i regression\_report\_log\_yyyymmdd\_serial\_number\_failed\_tests. Serijski broj predstavlja redni broj izveštaja za taj datum. Nakon kreiranja izveštaja poziva se Makefile i počinje simulacija.

Makefile ima sledeće ulazne parametre: lista testova koje treba izvršiti, regresioni tajmaut i ime regresionog izveštaja. Makefile će rekompajlirati softver pre svakog testa sa odgovarajućim aplikacijama i ulaznim parametrima. Ime testa i rezultati kompajliranja i izvršavanja testa biće upisani u izveštaj nakon završetka testa. Primer izveštaja je prikazan na slici 6.

```
*****SOFTWARE REGRESSION REPORT LOG*****
Regressions started on: 2017.03.29
Regressions started at: 16:51:27
trunk SVN revision: 5396
UM Library SVN revision: 133
Firmware SVN revision: 5396
LMAC SVN revision: 5396
DMA SVN revision: 5396
PHY Adapter SVN revision: 5396
*****

001_connect_1:
- Compiling firmware: OK
- Running test: Passed

001_connect_2:
- Compiling firmware: OK
- Running test: Passed

001_connect_3:
- Compiling firmware: OK
- Running test: Passed

001_connect_5:
- Compiling firmware: OK
- Running test: Passed
```

Slika 6. Primer regresionog izveštaja

Za testiranje Wi-Fi HaLow™ MAC softver steka korišćeni su testovi bazirani na događajima (event-ovima). Aplikacija je korišćena i kao drajver i čeker. Okidači događaja su postavljeni unutar MAC softver steka. Nihov broj i mesto unutar softvera birano je tako da ne menjaju ni vreme izvršavanja ni funkcionalnost MAC softver steka. Testovi su podeljeni u grupe prema funkcionalnostima koje testiraju. Unutar svake grupe, testovi su posebno numerisani. Svaki test ima svoju fasciklu u kojoj se nalaze: aplikacije za stanicu i Access Point, TCL skripta za podešavanje kanala i dokument sa ulaznim parametrima.

### 6. ZAKLJUČAK

Primarni zadatak ovog rada je bio testiranje Wi-Fi HaLow™ MAC softver steka koristeći VSP. Bilo je potrebno razviti okruženje za automatizovano regresiono pokretanje testova i generisanje izveštaja a zatim i testove za testiranje određenih funkcionalnosti. Svi zadaci su uspešno realizovani. Preko 200 testova je razvijeno i preko 150 grešaka i problema je pronađeno.

Ovi testovi su jedan deo testiranja Wi-Fi HaLow™ MAC softver steka. Razvijeni su da testiraju određene situacije u idealnim uslovima. Sledeći korak će biti prilagođavanje ovih testova za FPGA testiranje u kojem se prijem paketa ne može predvideti niti garantovati. U planu je i da se razvije automatizovano okruženje za regresiono testiranje na FPGA pločama.

### 7. LITERATURA

- [1] W. Sun, M. Choi, and S. Choi, "IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz," Journal of ICT Standardization, vol. 1, no. 1, pp. 83–108, 2013.
- [2] [https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en\\_US/home/tools/system-design-and-verification/software-driven-verification](https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/system-design-and-verification/software-driven-verification) (pristupljeno u septembru 2018)
- [3] IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11™-2016, IEEE Standards Activities Department, IEEE, 2016
- [4] IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, IEEE Std 802.11ah™-2016, IEEE Standards Activities Department, IEEE, 2016

#### Kratka biografija:



**Vladislav Pejić** rođen je 9.5.1991. u Sremskoj Mitrovici. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za elektroniku, u novembru 2015. godine.