



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Firefox WebExtensions security infrastructure

Sapienza Università degli studi di Roma
Laurea triennale in Ingegneria Informatica

Francesco Pasquali

ID number 1933764

Advisor

Prof. Emilio Coppa

Academic Year 2020/2021

Thesis not yet defended

Firefox WebExtensions security infrastructure

Tesi triennale. Sapienza University of Rome

© 2024 Francesco Pasquali. All rights reserved

This thesis has been typeset by L^AT_EX and the Sapthesis class.

Author's email: pasquali.1933764@studenti.uniroma1.it

Contents

1	Introduzione	1
1.1	Breve anatomia di un'estensione	1
2	Metodo	3
2.1	Threat model	3
2.2	Specifiche applicazione e piattaforma	3
2.3	L'estensione " <i>vuln</i> "	3
2.3.1	La vulnerabilità	4
2.4	Workflow dell'estensione	4
3	L'infrastruttura di sicurezza Firefox	7
3.1	Modello processi	7
3.2	Sicurezza livello script	8
3.2.1	Security Policy	8
3.2.2	Same-Origin Policy	8
3.2.3	Compartimenti Javascript	9
3.2.4	Entità di Sicurezza	10
3.2.5	Xray Vision	10
4	Estensioni nel dettaglio	13
4.1	Breve introduzione a XPCOM	13
4.2	Loading	14
5	Attaccando l'estensione "<i>vuln</i>"	15

Chapter 1

Introduzione

Nota: *Perché i browser?*

I Web Browser sono programmi complessi volti a visualizzare contenuti di vario genere provenienti dalle fonti più disparate, dai file locali alle risorse accessibili nell'Internet, dalle immagini ai linguaggi di scripting. In un mondo sempre più connesso, i browser sono diventati de facto applicazioni necessarie nella vita di tutti i giorni e utilizzate da una vastissima comunità di utenti; la loro diffusione unita alla capacità di eseguire codice javascript direttamente sulla macchina dell'utente rende i browser dei bersagli di interesse per il red-team, aprendo alla possibilità di compromettere un grande numero di dispositivi.

Nota: *Perché Firefox?*

Firefox è un Web Browser che in passato ha avuto un'ampia comunità di utenti, noto per le politiche a tutela privacy e la storica concorrenza con Internet Explorer.

Nota: *Perché le estensioni?*

Perché è codice scritto da terze parti a cui il browser dà accesso ai contenuti web e ad API privilegiato normalmente non accessibili dal DOM, queste caratteristiche mi hanno indotto ad astrarre le estensioni come una sorta di ponte tra la pagina e il sistema, certo le estensioni non sono le uniche componenti del browser a svolgere questo ruolo (basti pensare all'interprete html), ma a differenza delle altre esse sono programmabili (e programmate) da sviluppatori esterni al progetto Firefox e potenzialmente ignari sulle misure di sicurezza nello sviluppo web in ambiente browser. Con questi presupposti ho ipotizzato uno scenario in cui l'attaccante abbia la possibilità di sfruttare una estensione vulnerabile ad attacchi di tipo html injection e sono andato a studiare se e in che modo il browser sia in grado di difendersi da tale scenario.

1.1 Breve anatomia di un'estensione

Nota: *Approfondire* Una estensione è un insieme di script, fogli di stile e documenti html che modificano l'aspetto e il comportamento del browser, ad oggi.

*Qui forse
dovresti
citare le
tecnologie
di base di-
etro ad un
browser:
HTML, CSS,
Javascript,
etc.*

*direi una
mezza frase
su cosa è
Javascript*

*Direi non
solo red team
ma anche
in generali
attaccanti*

*E Chrome?
Non siamo
negli anni
2000!*

*Immagino
che qui devi
ancora es-
pandere per
dire che lo
hai consider-
ato... e che
poi hai scelto
di consid-
erare le sue
estensioni.*

*Mi racco-
mando cerca*

Chapter 2

Metodo

2.1 Threat model

- **Attaccante** Un membro del red-team interessato a compromettere il web browser (Firefox) della vittima come parte di una catena di attacco. Il suo obbiettivo è ottenere esecuzione di codice Javascript arbitrario che abbia accesso agli API interni di Firefox. Esso non ha altro modo di interagire con il sistema attaccato se non tramite una applicazione web di cui controlla quantomeno il codice dell'interfaccia utente; tale applicazione è visitabile attraverso un dominio pubblico ed espone endpoint http e/o https.
- **Vittima** Un utente privo di competenze in ambito cybersecurity. Esso è stato persuaso ad utilizzare la propria installazione di Firefox per visitare il dominio malevolo controllato dall'attaccante.

2.2 Specifiche applicazione e piattaforma

Per la mia ricerca ho svolto i test utilizzando l'ultima versione corrente di Mozilla Firefox v122.0 installata su MacOS Monterey v12.5 con processore Apple M1. Il codice sorgente studiato è stato scaricato dalla repository github ufficiale di mozilla, commit b59eed0; ogni menzione contenuta in questo articolo è relativa allo stato del codice risalente al suddetto commit. link: <https://github.com/JackieSpring/firefox/tree/b59eed054bcd27fbdf7e796ee5993dfb69d47f55>. L'applicazione è stata compilata seguendo le istruzioni riportate sul sito ufficiale di mozilla, link: https://firefox-source-docs.mozilla.org/setup/macos_build.html.

L'installazione di Firefox utilizzata dalla vittima è l'ultima versione corrente del browser (attualmente Firefox 122.0). La vittima ha installato una estensione, vulnerabile ad attacchi di code injection, che chiameremo "*vuln*".

2.3 L'estensione "*vuln*"

Il manifesto dell'estensione "*vuln*" dichiara tre componenti:

- Un **Content script** incaricato di ottenere coppie chiave-valore e inviarle in background. La coppia viene cercata all'interno della pagina e puo anche

essere ricevuta attraverso un evento custom "trigger", in entrambi i casi la protezione Xray deve essere attenuata esponendo l'estensione.

- Un **Background script** memorizza la coppie ricevuta dal content script in un archivio salvato nel local storage del browser, implementato come array di oggetti.
- Una **Sidebar** che visualizza i dati delle coppie nella propria finestra inserendoli come testo html.

I primi due compongono la logica dell'estensione mentre la sidebar funge da front-end ma non è l'unica componente visualizzabile, insieme ad essa il manifest permette di esporre altre finestre UI che sono i popup e la pagina delle opzioni personalizzata; per restringere il campo di studio ho deciso di usare solo una delle tre finestre front-end, ho ritenuto la sidebar il giusto candidato per le proprietà del componente:

- Il compartimento Javascript in cui viene eseguito il codice della sidebar ha gli stessi permessi di accesso al WebExtensionAPI dello script di background soddisfacendo gli obbiettivi di bersaglio del threat model.
- Il compartimento della finestra viene creato all'apertura della sidebar e rimane attivo fino alla chiusura della stessa garantendomi controllo sulla durata del suo ciclo di vita; inoltre la sidebar rimane visibile accanto ad ogni tab aperta favorendone il debugging;

2.3.1 La vulnerabilità

La vulnerabilità risiede nella logica della sidebar, nella funzione `updateArchiveView`

```
1         keyField.innerHTML = data.key + ": ";
2         valField.innerHTML = data.value;
3
4         container.appendChild( keyField );
5         container.appendChild(valField);
6
```

quando gli elementi `keyField` e `valField` vengono aggiunti all'albero di nodi del DOM, il campo `.innerHTML` viene valutato come valido codice HTML5 e interpretato, se "key" o "value" dovessero contenere tag html essi verranno inseriti nel documento come elementi validi (l'unica eccezione è il tag `<script>`, questo caso verrà approfondito in seguito).

2.4 Workflow dell'estensione

Nota: *Questa sezione andrebbe spostata nel capitolo di spiegazione dell'attacco* Il content script ottiene dal WebContent un oggetto contenente le proprietà "key" e "value", poiché l'oggetto proviene da un compartimento con privilegi minori il content script attenua la protezione sull'oggetto per poter leggere le proprietà non native, i dati vengono estratti, accorpati ad un messaggio, serializzati e trasmessi sul sistema di messaggi del runtime; durante questo passaggio vengono perse proprietà

e valori non serializzabili, come le funzioni. Alla ricezione di un messaggio lo script in background deserializza l'archivio

Chapter 3

L'infrastruttura di sicurezza Firefox

Ogni sito internet moderno ha in qualche modo il bisogno di interagire con la rete, con uno storage locale, con il file system e con dispositivi audio e video, tutte risorse gestite dal sistema operativo, pertanto ogni sito deve poter interagire con il sistema operativo della macchina client ma dare questo livello di accesso a codice insicuro significa esporre il sistema ad alti rischi di sicurezza per queste ragioni il browser deve esporre API che rendano possibili le operazioni richieste dal sito senza però compromettere la macchina host. Firefox non è direttamente responsabile della sicurezza del sistema, questo aspetto è invece gestito da rendering engine Gecko di cui Firefox è il front-end. Gecko applica quanto detto separando il codice eseguito in compartimenti logici, isolati in processi distinti, realizzando layer di separazione a livello applicativo e a livello fisico di sistema operativo.

3.1 Modello processi

Il codice che compone Firefox e Gecko non è eseguito sotto un unico processo, diversi servizi sono eseguiti in diversi processi per garantire solidità nel caso di fallimenti o compromissioni esterne; si dividono in tre categorie:

- **Parent Process** è il processo principe nonché padre di tutti gli altri, è incaricato di coordinare i processi figlio e gestire la comunicazione tra di essi. Visualizza pagine ad alti privilegi come `about:preferences` e `about:config`, pertanto ospita un ambiente di esecuzione ristretto.
- **Helper Processes** sono processi che ospitano servizi, tra essi vi sono servizi di interazione con il file system, con la rete, con le immagini e altri ancora.
- **Content Processes** sono processi usati per renderizzare contenuto web, insieme al Parent sono gli unici a poter eseguire codice Javascript. Vengono suddivisi in "remote-type", proprietà che specificano i privilegi di accesso agli API.

Ci sono molti tipi di Content Process di cui due sono di particolare interesse per la mia ricerca:

- **WebExtensions Content Process** È utilizzato per caricare pagine in background e i subframe delle estensioni web; esiste una sola istanza di questo processo ed ha assegnato il remote-type "extension" che garantisce l'accesso al WebExtensionAPI e alla Shared Memory. Tutte le estensioni condividono questo processo e sono visibili tra di loro.
- **Isolated Web Content Process** Sono usati per ospitare contenuti web attribuiti ad un sito, il codice web eseguito in questi processi è considerato insicuro e l'accesso diretto agli API di sistema non è permesso. Un nuovo web content viene allocato per ogni sito visitato su una browser tab, qualsiasi dominio visitato su una tab differente produce un nuovo processo Web Content isolato, invece subframe aperti sullo stesso dominio del superframe contenitore vengono eseguiti nello stesso processo del super-frame.

3.2 Sicurezza livello script

Il codice Javascript eseguito da Gecko non proviene solo da fonti terze come pagine web o estensioni, l'interfaccia grafica del browser (Firefox) e la logica sono controllati da moduli javascript ad alti privilegi di accesso pertanto gli script web non possono eseguire nello stesso ambiente del javascript di sistema. Il modello processi in se potrebbe sembrare una soluzione adeguata, ma se script web e di sistema dovessero eseguire nello stesso processo si creerebbe un conflitto, inoltre il browser deve poter accedere a oggetti del web content; la separazione in processi è troppo restrittiva per questi utilizzi; inoltre Javascript è un linguaggio a tipizzazione debole, funzionale e di cui le strutture di supporto alla programmazione ad oggetti sono modificabili, un esempio dei rischi introdotti da questa dinamicità sono gli attacchi di prototype pollution. Il modello di separazione dei processi non è sufficiente a gestire proprietà di linguaggio.

3.2.1 Security Policy

Una Security Policy è una definizione di che cose significhi "essere sicuro" per un sistema, nel caso di Gecko definisce il livello di accesso garantito verso un oggetto da parte di un altro oggetto in relazione a due rapporti: di Origine e di Privilegi. Gli oggetti dotati di stessa "origine" sono detti "**same-origin**" e hanno libero accesso alle proprietà, oggetti dotati di "origine" differente sono detti "**cross-origin**" e hanno accesso molto ristretto alle proprietà dell'altro.

Se l'oggetto acceduto si trova in uno scope di privilegio più basso allora l'accedente avrà permessi di accesso libero ma potrà vedere solo un insieme ristretto di proprietà ma se invece l'oggetto acceduto dovesse trovarsi in uno scope con privilegi più alti allora non otterrà alcun privilegio di accesso. Script "privilegiati" possono clonare uno o più oggetti in scope meno "privilegiati".

3.2.2 Same-Origin Policy

La Same-Origin Policy è un insieme di regole d'accesso a risorse situate su altre "origini". L' "origine" di una risorsa è definita come tripla di protocollo, dominio e

porta, due risorse che condividono la stessa origine sono dette **same-origin**, altrimenti **cross-origin**. Le restrizioni imposte dalla Same-Origin Policy dipendono dal contesto d'uso:

- **Rete** Solitamente una risorsa di rete **cross-origin** ottiene accesso in scrittura ed embedding mentre la lettura viene proibita, cioè viene reso possibile inviare richieste cross-origin e incorporare risorse esterne ma non è possibile conoscere il contenuto della risposta. Le regole d'accesso di rete **cross-origin** possono essere modificate dalla risorsa acceduta tramite header http o tag html **meta**.
- **Storage** Gli spazi di archiviazione sono separati e indipendenti per ogni origine
- **Javascript API** Due sono gli oggetti visibili a **cross-origin**: **window** e **location**, di questi solo un sottoinsieme di proprietà è accessibile, tra queste sono notevoli **.postMessage** di **window** che consente di scambiare dati **cross-origin** tra gli script e **.href** di **location**, accessibile solo in scrittura, permette di redirigere la finestra.

Eccezioni

Non tutti i protocolli vengono trattati allo stesso modo dalla Same-Origin Policy, le risorse caricate da **about:blank** o **javascript:** sono considerate avere la stessa origine del documento che le contiene, mentre l'origine **file:///** è trattata come origine opaca cioè le risorse ottenute con questo protocollo non sono mai considerate same-origin, nemmeno se risiedono nella stessa directory.

Iframe pitfall

Nota: *Rimuovere?* L'implementazione degli iframes risente di una piccola falla di referenza; quando viene inserito nel documento, **iframe** incorpora la pagina **about:blank** che viene sostituita non appena la risorsa è caricata, pertanto lo stesso iframe mostra agli API javascript oggetti con origine differente in due momenti diversi.

3.2.3 Compartimenti Javascript

I compartimenti sono aree di memoria indipendenti e sono alla base della sicurezza degli script in Gecko; ogni oggetto globale e gli oggetti associati alle sue proprietà condividono lo stesso compartimento. Gli oggetti memorizzati in un compartimento non sono direttamente accessibili da script appartenente ad un compartimento diverso, la condivisione di oggetti è ottenuta tramite oggetti wrapper memorizzati nel compartimento dello script che referenziano l'oggetto originale, il grado di accesso fornito dal wrapper verso l'oggetto rappresentato è determinato da Gecko secondo la Security Policy. I criteri di origine sono valutati considerando come "origine" l'url dell'istanza di **window**, che è oggetto globale di ogni compartimento. I criteri di privilegio sono invece determinati secondo l'Entità di Sicurezza del compartimento.

- **Same-Origin** È il caso più comune, all'oggetto accedente viene concesso un wrapper trasparente che garantisce accesso completo all'oggetto richiesto come se fosse parte dello stesso compartimento.
- **Cross-Origin** Gecko assegna un wrapper cross-origin che limita l'accesso secondo la Same-Origin Policy.
- **Privilegio Maggiore** Se lo scope acceduto ha privilegi minori, allora si ottiene un wrapper Xray (di più su Xray Vision in seguito)
- **Privilegio Minore** Se lo scope acceduto ha privilegi maggiori, allora si ottiene un wrapper opaco che nega l'accesso all'oggetto.

3.2.4 Entità di Sicurezza

Un Entità di Sicurezza è qualunque entità che può essere autenticata da un sistema, in Gecko esistono quattro entità sulle quali è definita una relazione di sicurezza. Per determinare il rapporto tra due entità si verifica se ciascuna sussume l'altra. Le quattro entità sono:

- **Entità di sistema** Supera ogni check di sicurezza, sussume se stessa e tutte le altre entità. I compartimenti che eseguono codice di sistema sono istanze di questa entità.
- **Entità di Contenuto** È associata ai contenuti web ed è definita dall'origine del contenuto, sussume ogni altra entità con cui condivide l'origine.
- **Entità Espansa** È definita come una lista di "origini" su cui si ha accesso completo, essa sussume ogni entità che abbia inclusa la propria origine nella lista ma non è sussunta da nessuna di esse. Un esempio di impiego delle entità espanse sono i Content Script delle estensioni che possono accedere al contenuto di più pagine ma non viceversa. In generale l'entità espansa è utilizzata per garantire permessi cross-origin allo script senza però renderlo entità di sistema.
- **Entità Nulla** Fallisce quasi tutti i check e non sussume se stesso, può essere acceduto solo da un'entità di sistema.

Le entità non modellizzano solo il livello di privilegio del compartimento ma anche l'origine e il test di relazione fornisce le informazioni sufficienti a computare un wrapper secondo la Security Policy, infatti se un compartimento sussume l'altro allora deve avere privilegi pari o maggiori, se entrambi si sussumano allora sono **same-origin**, se nessuno sussume allora si tratta di un accesso **cross-origin** se invece è uno solo dei due a sussumere allora vi è una differenza di privilegi. L'algoritmo di decisione impiegato da Gecko è rappresentato in questo grafico:

3.2.5 Xray Vision

Javascript è un linguaggio molto malleabile il che lo rende imprevedibile in un contesto di sicurezza, oggetti provenienti da compartimenti insicuri potrebbero venire

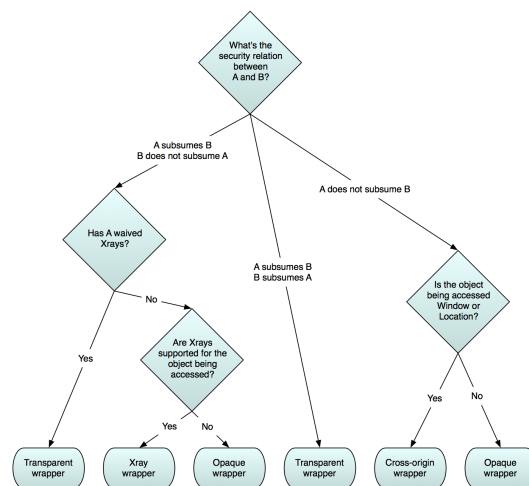


Figure 3.1. Computare un wrapper

adeguatamente modificati per ingannare gli script privilegiati ad eseguire codice malevolo; per arginare il problema Gecko fa uso dei wrapper Xray, che consentono accesso completo alla forma "base" dell'oggetto ignorando le modifiche attuate dagli script, il modo in cui viene ottenuta dipende dall'oggetto acceduto.

Gli elementi del DOM sono gli oggetti più comuni e hanno due implementazioni: una a livello Javascript che "vive" all'interno del proprio compartimento e memorizza lo stato corrente dell'oggetto, e una in codice nativo C++ che descrive la forma base dell'oggetto, quando il codice privilegiato deve accedere ad un elemento del DOM, gli viene restituito un wrapper Xray che mostra le proprietà della rappresentazione nativa. Alcuni oggetti esistono solo nel runtime Javascript, come gli `Array` o le `Promise`, allora si restringono le loro proprietà trattandoli come dizionari: metodi, getter e setter sono ignorati per impedire l'esecuzione di codice malevolo mentre il prototype di `Object` e `Array` viene rimpiazzato con il prototipo standard garantendo l'integrità.

Semmai il codice privilegiato avesse bisogno di conoscere lo stato corrente dell'oggetto la visione Xray può venire attenuata programmaticamente accedendo alla proprietà `.wrappedJSObject`, ma a questo punto non si avrebbero più garanzie di sicurezza su di esso, nè sui "figli".

Chapter 4

Estensioni nel dettaglio

Nota: Approfondire il ruolo di `WebExtensionPolicy` nelle chiamate IPC

Nota: Approfondire il ruolo di `ContentSecurityPolicy` nelle chiamate agli API

Quanto segue descrive la logica e le strutture che implementano il sistema delle WebExtensions a runtime, dal termine dell'installazione all'iniezione del codice nel processo. Sono operazioni svolte in due ambienti, nativo e javascript, ed interessano più componenti di Gecko, il mio studio si è concentrato sulla rappresentazione in ambiente javascript delle estensioni attive in un processo tralasciando i dettagli di archiviazione dei dati o di allocazione dei compartimenti. **Assert:** *Continua, spiega che JS è malleabile e che puoi fare prototypepollution e che il codice è troppo grande per C++*

4.1 Breve introduzione a XPCOM

XPCOM Framework è un ambiente di sviluppo multi piattaforma che astrae elementi del sistema operativo, come la gestione della memoria, passing di messaggi e memoria condivisa, e fornisce interfacce di comunicazione tra linguaggi programmazione; è il collante fondamentale tra i processi e le componenti di Gecko. Tra le feature di XPCOM il sottosistema XPConnect offre un linguaggio per definire interfacce di programmazione chiamato `idl` (Interface Definition Language) e un linguaggio per definire protocolli di comunicazione inter-processo ed RPC chiamato `ipdl` (Inte-process communication Protocol Definition Language); il file di definizione, sia esso `idl` o `ipdl` , viene compilato in rappresentazioni equivalenti nei linguaggi di destinazione mentre la logica è implementata dal programmatore usando uno dei linguaggi specificati, al momento XPConnect supporta C++, Rust, Python, Javascript e pochi altri, tutti impiegati nello sviluppo di Gecko.

Voglio aprire una parentesi di approfondimento su `ipdl` per fare chiarezza sul concetto di *Attore*, menzionato nelle sezioni successive. A differenza delle interfacce un protocollo ha bisogno di due entità, dette Attori, che utilizzino il protocollo per un fine di comunicazione, `ipdl` si riferisce ad essi come Parent e Child. Il Parent viene collocato sul processo che rimarrà attivo più a lungo, idealmente il genitore, mentre il Child è l'entità corrispondente attiva su un altro processo, idealmente figlio del primo. Durante la compilazione, XPConnect genera sia le strutture di rappresentazione dei protocolli che le interfacce di programmazione per gli attori,

implementate allo stesso modo delle interfacce `idl` .

4.2 Loading

La vita di una estensione è legata a due classi: `AddonManager` ed `ExtensionProcessScript` , la prima è una classe singleton collocata nel Parent Process e responsabile della archiviazione degli Addon e delle estensioni (prima di supportare lo standard `WebExtension`, Firefox veniva espanso usando gli Addon, `AddonManager` è stata modificata successivamente per adattarsi al nuovo standard; quella degli Addon è una storia affascinante che si intreccia con l'evoluzione del sistema di sicurezza del browser). Quando una estensione viene installata è `AddonManager` a prendersi carico del collezionamento dei nuovi script nel database e di avviarli per la prima volta mentre il browser è in esecuzione; ma se `AddonManager` è situata nella memoria del Parent Process come può iniettare uno script su altri processi isolati? `ExtensionProcessScript` è un'altra classe singleton attiva su ogni Content Process, è incaricata di ottenere i dati e il codice delle estensioni e farne il setup preparandoli per il successivo utilizzo; inoltre è indirettamente responsabile dell'avvio all'interno del processo. Per rappresentare l'estensione `ExtensionProcessScript` istanzia un oggetto `WebExtensionPolicy` che ha la duplice funzione di astrarre l'estensione stessa e le informazioni di sicurezza associate tra cui l'entità di sicurezza, la Content Security Policy, l'Origin e altre proprietà interne; tutti gli oggetti menzionati sono descritti da interfacce `idl` ed implementati in codice nativo, eccetto `mozIExtensionProcessScript` . scritto direttamente in Javascript.

Chapter 5

Attaccando l'estensione "*vuln*"