

Department of Information Engineering and Computer Science

Bachelor’s Degree in

COMPUTER SCIENCE

final dissertation

Development of a gui for the

packet loss concealment testbench tool

|  |  |
| --- | --- |
| Supervisor  Prof. Luca Turchet  Ph.D Luca Vignati | Student  Stefano Dallona |

Academic year 22/23

**Acknowledgements**

To my wife and to my daughters

who constantly supported me during this journey

**INDEX**

[**1** **Packet Loss Concealing (PLC)** 7](#_Toc146324717)

[**1.1** **Digital audio fundamental concepts** 7](#_Toc146324718)

[**1.2** **Domain (Real-time streaming of audio data excluding speech)** 8](#_Toc146324719)

[**1.3** **Packet loss simulation** 8](#_Toc146324720)

[1.3.1 Binomial probability distribution 8](#_Toc146324721)

[1.3.2 Gilbert-Elliot loss model 9](#_Toc146324722)

[**1.4** **Packet loss concealment** 10](#_Toc146324723)

[**1.5** **Output analysis metrics** 10](#_Toc146324724)

[**2** **PLC Testbench UI** 10](#_Toc146324725)

[**2.1** **Web GUI’s main functions** 10](#_Toc146324726)

[**2.1.1** **Configuration of the input data** 10](#_Toc146324727)

[**2.1.2** **Execution management and monitoring** 10](#_Toc146324728)

[**2.1.3** **Analysis of the execution’s results** 10](#_Toc146324729)

[**2.2** **Technical choices** 10](#_Toc146324730)

[**2.2.1** **Project architecture** 10](#_Toc146324731)

[**2.2.2** **Adopted programming languages** 10](#_Toc146324732)

[**2.2.3** **Frameworks** 10](#_Toc146324733)

[**2.2.4** **Packaging and distribution** 10](#_Toc146324734)

[**3** **Results** 10](#_Toc146324735)

[**3.1** **Validation of the PLC-TestBench tool** 10](#_Toc146324736)

[**3.2** **Extension of the tool usability** 10](#_Toc146324737)

[**3.3** **Improved user experience** 11](#_Toc146324738)

[**4** **Conclusion** 11](#_Toc146324739)

***Note***

*The maximum number of pages is* ***30****, including:*

* *index*
* *abstract*
* *chapters*

*Excluding:*

* *frontispiece*
* *acknowledgements*
* *attachments*

**Abstract**

….

***Note***

*The abstract is a short summary of the work describing the target, the subject of the thesis, the methodology and the techniques, the data collection and elaboration, the explanation of the reached results and the conclusion. The abstract of the dissertation must have a maximum length of 3 pages and must include the following information:*

* *context and motivation*
* *short summary of the main problem you have dealt with*
* *developed and /or used techniques*
* *reached results, the personal contribution of the student has to be highlighted*

*The purpose of this thesis was implementing a graphical user interface for the PLC (Packet Loss Concealment) Testbench Tool developed by the Ph.D student Luca Vignati, thus making the tool easier to use while at the same time empowering the interpretation and analysis of the tool’s outputs.*

*Before the implementation of this user interface, the only available interaction took place directly in a Jupyter Notebook, where inputs must be given directly by modifying the code. This required the user to have a fully functional development environment, with all the complexity implied and it also required the user to be familiar with Python programming. Moreover, there was no aid in the interpretation of results, so the only option was to consult the raw output audio files and images. This type of interaction is suboptimal, especially in terms of consulting the results, as one is forced to consider one element at a time, precluding the possibility of increasing the quality of the analysis by considering multiple aspects at once.*

*PLC algorithms are typically needed in real-time data transmission contexts, and their role is to mask (“conceal”) any loss that may occur to one or more packets in a manner that is transparent to the application consuming the data stream.*

*The PLC Testbench Tool aims at providing a modular framework to support a qualitative and quantitative comparison of different PLC algorithms’ performance, by applying two or more of them to a set of audio files provided as an input to the tool. Packet loss is simulated by applying stochastic**mathematical models with configurable parametrization. The software package includes an implementation of the most frequently used packet loss simulation algorithms such as the Binomial PLS, based on binomial loss probability distribution and the Gilbert-Elliott PLS, based on a two-states Markov’s chain.*

*The qualitative analysis is supported by several visual representations of the audio signals’ features (lost packets masks, waveforms, spectrograms) and by the possibility to play any subset of each produced audio track to evaluate its perceived quality.*

*The quantitative analysis of the PLC algorithm outcome is supported by multiple metrics produced by the tool for each of the reconstructed audio files like the Mean Square Error (MSE), the Mean Absolute Error (MAE), the Spectral Energy, the PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality).*

*As a framework, the tool can be easily extended by providing additional implementations of the different object types (PLS algorithm, PLC algorithm, output analysis metric).*

*The GUI can handle these extensions transparently exposing the new features without the need of any code modifications. This is achieved by exploiting the underlying programming language’s introspection capabilities and by scanning the PLC testbench library to discover the custom features.*

*Each elaboration of the tool produces a result dataset, conventionally called a “Run”, which contains a snapshot of all the input parameters and of all the output produced (lost packets masks, reconstructed audio, metrics’ file).*

*The elaboration can be represented as a forest of trees whose root node is associated to one of the audio file given as input. Each input file originates multiple loss simulations, one for each instance of a packet loss algorithm configured. Loss simulations can be mapped to nodes at depth one in the trees and the corresponding audio tracks are in turn reconstructed by applying each one of the PLC algorithms configured at Run level.*

*Reconstructed audio files are represented by nodes at depth two in the trees. Finally, each reconstructed algorithm is evaluated by applying each metric configured in the Run to the corresponding reconstructed audio track.*

*Multiple instances of each configuration object can be set on a Run, as long as the corresponding settings are unique within the Run.*

*During the design phase different types of GUI were evaluated and their pros and cons were carefully weighted up. Finally, the decision was made to go for the development of a web application because of the many advantages offered by the web technology, like a wide range of deployment modes (ranging from a local standalone environment to big, distributed infrastructures), the portability of the application on different platforms, the ease of installation. All of this comes at the price of a slightly increased effort in the implementation.*

*In order to make the distribution of the software as easy as possible, despite the very large number of dependencies in terms of required libraries, it was decided to leverage containers technology.*

*The design of the GUI was made with a particular focus on modularity to make maintenance and future enhancements easier. Modularity was achieved by building graphical widgets that can be reused across the application.*

*The development of the application presented several challenges, especially because of the large amount of data inherently involved by the audio processing. Even short audio tracks are composed of millions of samples that needed to be represented visually as waveforms and/or streamed as sound in real-time. In order to reach the desired performance subsampling techniques and multiple optimizations had to be adopted.*

*Another challenging aspect was the wide spectrum of technologies and programming languages to be learnt in a relatively short period of time.*

*Lo scopo di questa tesi era quello di implementare un'interfaccia utente grafica per il Testbench Tool PLC (Packet Loss Concealment) sviluppato dal dottorando Luca Vignati, rendendo così lo strumento più facile da usare e allo stesso tempo potenziando l'interpretazione e l'analisi dei dati di output dello strumento.*

*Prima dell'implementazione di questa interfaccia utente, l'unica interazione disponibile avveniva direttamente in un Jupyter Notebook, dove gli input dovevano essere immessi direttamente modificando il codice. Ciò richiedeva che l'utente disponesse di un ambiente di sviluppo completamente funzionale, con tutta la complessità che ciò implica, e richiedeva anche che l'utente avesse familiarità con la programmazione Python. Inoltre, non vi era alcun aiuto nell'interpretazione dei risultati, quindi l'unica opzione era consultare i file audio e le immagini grezze di output. Questo tipo di interazione non è ottimale, soprattutto in termini di consultazione dei risultati, in quanto si è costretti a considerare un elemento alla volta, precludendosi la possibilità di aumentare la qualità dell'analisi considerando più aspetti contemporaneamente.*

*Gli algoritmi PLC sono generalmente necessari in contesti di trasmissione dati in tempo reale e il loro ruolo è quello di mascherare ("nascondere") qualsiasi perdita che potrebbe verificarsi in uno o più pacchetti in modo trasparente per l'applicazione che utilizza il flusso di dati.*

*Lo strumento PLC Testbench mira a fornire un framework modulare per supportare un confronto qualitativo e quantitativo delle prestazioni di diversi algoritmi PLC, applicandone due o più a una serie di file audio forniti come input allo strumento. La perdita di pacchetti viene simulata applicando modelli matematici stocastici con parametrizzazione configurabile. Il pacchetto software include un'implementazione degli algoritmi di simulazione della perdita di pacchetti utilizzati più frequentemente come il Binomial PLS, basato sulla distribuzione binomiale della probabilità di perdita e il Gilbert-Elliott PLS, basato su una catena di Markov a due stati.*

*L’analisi qualitativa è supportata da numerose rappresentazioni visive delle caratteristiche dei segnali audio (maschere dei pacchetti persi, forme d’onda, spettrogrammi) e dalla possibilità di riprodurre qualsiasi sottoinsieme di ciascuna traccia audio prodotta per valutarne la qualità percepita.*

*L'analisi quantitativa del risultato dell'algoritmo PLC è supportata da molteplici metriche prodotte dallo strumento per ciascuno dei file audio ricostruiti, come l’errore quadratico medio, l’energia spettrale, PEAQ (valutazione percettiva della qualità audio).*

*Come framework, lo strumento può essere facilmente esteso fornendo implementazioni aggiuntive dei diversi tipi di oggetti (algoritmo PLS, algoritmo PLC, metrica di analisi dell'output).*

*La GUI può gestire queste estensioni esponendo in modo trasparente le nuove funzionalità senza la necessità di alcuna modifica del codice. Ciò si ottiene sfruttando le capacità di introspezione del linguaggio di programmazione sottostante e scansionando la libreria del banco di prova del PLC per scoprire le funzionalità personalizzate.*

*Ogni elaborazione dello strumento produce un dataset di risultati, convenzionalmente chiamato “Run”, che contiene un'istantanea di tutti i parametri di input e di tutto l'output prodotto (maschere di pacchetti persi, audio ricostruito, file di metriche).*

*L'elaborazione può essere rappresentata come una foresta di alberi il cui nodo radice è associato ad uno dei file audio forniti in input. Ogni file di input dà origine a più simulazioni di perdita, una per ogni istanza di un algoritmo di perdita di pacchetti configurato. Le simulazioni di perdita possono essere mappate sui nodi alla profondità uno negli alberi e le tracce audio corrispondenti vengono a loro volta ricostruite applicando ciascuno degli algoritmi PLC configurati a livello Run. I file audio ricostruiti sono rappresentati da nodi a profondità due negli alberi. Infine, ciascun algoritmo ricostruito viene valutato applicando ciascuna metrica configurata nel Run alla corrispondente traccia audio ricostruita.*

*È possibile impostare più istanze di ciascun oggetto di configurazione su un'esecuzione, purché le impostazioni corrispondenti siano univoche all'interno dell'esecuzione.*

*Durante la fase di progettazione sono stati valutati diversi tipi di GUI e i loro pro e contro sono stati attentamente soppesati. Infine, si è deciso di optare per lo sviluppo di un'applicazione web a causa dei numerosi vantaggi offerti dalla tecnologia web, come un'ampia gamma di modalità di implementazione (che vanno da un ambiente locale autonomo a grandi infrastrutture distribuite), la portabilità dell'applicazione su diverse piattaforme, la facilità di installazione. Tutto ciò al prezzo di uno sforzo leggermente maggiore nell’implementazione.*

*Per rendere la distribuzione del software il più semplice possibile, nonostante l'elevato numero di dipendenze in termini di librerie richieste, si è deciso di sfruttare la tecnologia dei containers.*

*Il design della GUI è stato realizzato con particolare attenzione alla modularità per facilitare la manutenzione e i futuri miglioramenti. La modularità è stata ottenuta costruendo widget grafici che possono essere riutilizzati in tutta l'applicazione.*

*Lo sviluppo dell'applicazione ha presentato diverse sfide, soprattutto a causa della grande quantità di dati intrinsecamente coinvolti nell'elaborazione audio. Anche tracce audio molto brevi sono composte da milioni di campioni che dovevano essere rappresentati visivamente come forme d'onda e/o riprodotti in streaming come suono in tempo reale. Per raggiungere le prestazioni desiderate è stato necessario adottare tecniche di sottocampionamento e ottimizzazioni multiple.*

*Un altro aspetto impegnativo è stato l’ampio spettro di tecnologie e linguaggi di programmazione da apprendere in un periodo di tempo relativamente breve.*

1. **Packet Loss Concealing (PLC)**
   1. **Digital audio fundamental concepts**

Sound transmission is a phisical phenomenon consisting of a pressure wave propagating across gaseous, liquid or solid medium. The frequency, amplitude and phase of this wave can change over time, originating a frequency spectrum. Sound can be perceived by the human ear only if any of the frequencies in the spectrum falls within a certain range, called human auditory field.

Digital audio is a representation of sound in a digital form. Typically the pressure wave amplitude is sampled at regular intervals and its value is mapped to a discrete range of values, thus originating a stream of numbers.

According to the Nyquist–Shannon sampling theorem, in order to sample all frequencies included in the human auditory field an audio signal must be sampled at a rate of 44.1 kHz .

La trasmissione del suono è un fenomeno fisico costituito da un'onda di pressione che si propaga attraverso un mezzo gassoso, fluido o solido. La frequenza, l'ampiezza e la fase di quest'onda possono cambiare nel tempo, originando uno spettro di frequenze. Il suono può essere percepito dall'orecchio umano solo se una qualsiasi delle frequenze dello spettro rientra in un determinato intervallo, chiamato campo uditivo umano.

L'audio digitale è una rappresentazione del suono in forma digitale. Tipicamente l'ampiezza dell'onda di pressione viene campionata a intervalli regolari e il suo valore viene mappato su un intervallo discreto di valori, dando così origine ad un flusso di numeri.

Secondo il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon, per campionare tutte le frequenze comprese nel campo uditivo umano un segnale audio deve essere campionato ad una frequenza di 44,1 kHz .

.

A diagram of a wave

Description automatically generated with medium confidence A graph with red and blue dots

Description automatically generated

* 1. **Domain (Real-time streaming of audio data excluding speech)**

The packet loss can be simulated by randomly dropping some packets from the original audio stream based on a given probability distribution. The random variable represents a packet transmission whose possible outcomes are successful transmission or packet loss.

* 1. **Packet loss simulation**

The packet loss can be simulated by randomly dropping some packets from the original audio stream based on a given probability distribution. The random variable represents a packet transmission whose possible outcomes are successful transmission or packet loss.

La perdita di pacchetti può essere simulata eliminando casualmente alcuni pacchetti dal flusso audio originale in base a una determinata distribuzione di probabilità. La variabile casuale associata alla distribuzione di probabilità rappresenta la trasmissione di un pacchetto, i cui possibili esiti sono la trasmissione riuscita o la perdita del pacchetto.

### Binomial probability distribution

In this model the probability of the random variable to take the value corresponding to a lost packet follows a binomial probability distribution, which represents the sum of a series of multiple independent and identically distributed Bernoulli trials. A Bernoulli trial is a random experiment with exactly two possible outcomes (success/failure), whose probabilities are p [0, 1] and q = 1 – p [0, 1].

The resulting probability to get N success/failure events in a row is described by the following formula based on the binomial coefficients.

In questo modello la probabilità che la variabile casuale assuma il valore corrispondente a un pacchetto perso segue una distribuzione di probabilità binomiale, che rappresenta la somma di una serie di più prove Bernoulliane indipendenti e identicamente distribuite. Una prova di Bernoulli è un esperimento casuale con esattamente due possibili esiti (successo/fallimento), le cui probabilità sono p [0, 1] e q = 1 – p [0, 1].

La probabilità risultante di ottenere N eventi consecutivi di successo/fallimento è descritta dalla seguente formula basata sui coefficienti binomiali.

A math equations on a white background

Description automatically generated

### Gilbert-Elliot loss model

Compared to models based on a single probability distribution, Gilbert-Elliot model has the big advantage of keeping into account the correlation between loss events. While in the binomial distribution loss model each loss event is unrelated to the previous one and therefore its probability is independent, in the Gilbert-Elliot model the probability of each loss event is conditioned by the previous one.

This behaviour is in line with the assumptions of the Markov’s chains and in fact Gilbert-Elliot model can be considered a two-state Markov’s chain whose graph is the one depicted below.

A diagram of a circular object

Description automatically generated

This model is much more accurate compared to single distribution models, because in the real-world packet loss is usually caused by failures or congestion in the transmission network and therefore tends to happen in bursts.

So, when a first loss is experienced, it is more likely that subsequent packets are lost compared to a transmission success scenario, because the system has usually transitioned from a working to a non-working state. In the same way, when the last packet has been transmitted successfully this is an indication that the system is working properly and therefore the probability that the next packet will not be lost is higher than when the system is in a non-working state.

Questo modello è molto più accurato rispetto ai modelli a distribuzione singola, perché nel mondo reale la perdita di pacchetti è solitamente causata da guasti o congestione nella rete di trasmissione e quindi tende a verificarsi a raffiche.

Pertanto, quando si verifica una prima perdita, è più probabile che i pacchetti successivi vengano persi rispetto a uno scenario di trasmissione riuscita, perché il sistema è solitamente passato da uno stato funzionante a uno non funzionante. Allo stesso modo, quando l'ultimo pacchetto è stato trasmesso con successo ciò è indice che il sistema funziona correttamente e quindi la probabilità che il pacchetto successivo non vada perso è maggiore rispetto a quando il sistema è in uno stato non funzionante.

* 1. **Packet loss concealment**

…

* 1. **Output analysis metrics**

…

1. **PLC Testbench UI**

...

* 1. **Web GUI’s main functions**

...

* + 1. **Configuration of the input data**

...

* + 1. **Execution management and monitoring**

...

* + 1. **Analysis of the execution’s results**

….

* 1. **Technical choices**
     1. **Project architecture**

...

* + 1. **Adopted programming languages**

...

* + 1. **Frameworks**

….

* + 1. **Packaging and distribution**

….

1. **Results**
   1. **Validation of the PLC-TestBench tool**

...

* 1. **Extension of the tool usability**

...

* 1. **Improved user experience**

...

1. **Conclusion**

..,.

**Bibliography**

[1] Coulouris G. F., Dollimore J. e Kindberg T, Distributed Systems: concepts and Design, 1994

[2] Dalal N., Triggs B., Histograms of Oriented Gradients for Human Detection, 2005

[3] Donoho D. L., Compressed Sensing,

[4] http://www.ictbusiness.it/

***Note***

*In the bibliography, all the sources consulted for the dissertation have to be cited and listed in alphabetical order by the first author's surname.*

*According to the source material, the quotation has to be as follows:*

*BOOKS*

*Surname and initial/s of the name/s of the author/s, date of edition, publishing house and (if applicable) number of edition.*

*JOURNAL ARTICLES*

*Surname and initial/s of the first name/s of the author/s, title of the article, name of the journal, volume number, issue number and page numbers.*

*CONFERENCE PAPERS*

*Surname and initial/s of the name/s of the author/s, year of the conference, title of the article, name of the conference, place of the conference, conference dates, page numbers.*

*CITING WEB RESOURCES*

*The consulted webpages have to be listed in alphabetical order.*

*It is necessary to:*

* *Copy the specific URL (the web address) of the consulted webpage*
* *If available, indicate the surname and first name of the author/s, the title and subtitle of the text*
* *If available, indicate the last date you retrieved the webpage (day/month/year).*

**Attachment A Title of the first attachment**

….

***Please note:***

*This section is optional**.*

**Title**

….

**Subtitle**

….

**Attachment B Title of the second attachment**

….

***Please note:***

*This section is optional.*

**Title**

….

**Subtitle**

….