

3G モバイルパケットネットワークにおける スプリアスタイムアウト検出アルゴリズムの適用と評価

関口 克己, 外村 彩†1, 山本 和徳, 鈴木 偉元, 石川 憲洋†2, 高橋 修†3

†1 株式会社 NTT ドコモ ネットワークシステム開発部

†2 株式会社 NTT ドコモ ネットワークマネジメント開発部

†3 公立はこだて未来大学 システム情報科学部

あらまし 第三世代携帯電話システムの無線パケット回線の特性は、帯域幅遅延積が大きいこと、無線チャネル制御、電波環境の変動など要因で突発的な遅延変動が生じること、などの特徴が挙げられる。突発的な遅延変動は、トランスポート層に用いられる TCP にスプリアスタイムアウト再送を発生させる要因となり、通信品質の低下を引き起こす。本稿では、スプリアスタイムアウトの対策として F-RTO と Eifel Response に着目し、モバイルパケットネットワークに適用した際の基本的な特性をモデル化し解析を行った上で、IMT-2000 実網での性能測定を行い有効性の評価を行った。

キーワード IMT-2000, W-TCP, F-RTO, Eifel Response, Spurious Timeout

Evaluation of Spurious Timeout Detection Algorithms over 3G Mobile Packet Access Network

Katsumi Sekiguchi, Aya Hokamura†1, Kazunori Yamamoto,
Hideharu Suzuki, Norihiro Ishikawa†2, Osamu Takahashi†3

†1 NTT DoCoMo, Inc Network System Development Department

†2 NTT DoCoMo, Inc Network Management Development Department

†3 Future University-Hakodate, School of Systems Information Science

Abstract The packet access channel of 3rd generation mobile communication system has unique characteristics such as a large bandwidth delay product, a delay spike caused by wireless channel control and fluctuation of radio signal. The delay spike causes retransmission of TCP caused by the timeout and generates spurious retransmission in mobile packet data access which uses TCP for the transport layer. F-RTO and Eifel Response has been proposed as a detection algorithm and congestion control algorithm after the detection and standardization is advanced in IETF. In this paper, we perform theoretical analysis of basic performance of F-RTO and Eifel Response and applied to the IMT-2000 and evaluated the performance under different radio environment we assumed in the third generation mobile network and evaluated its efficiency.

Key words IMT-2000, W-TCP, F-RTO, Eifel Response, Spurious Timeout

1. あらまし

第三代携帯電話システム(IMT-2000)が普及期に入り、広帯域無線パケットベアラを活用したマルチメディアサービスが提供され始めている。また、下り無線リンクを高速化した HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)[1]のサービス提供が予定されており、固定アクセス回線並のモバイルアクセス環境が実現される。

IMT-2000 パケットの回線特性は、無線区間の誤りを Layer2 の再送制御で回復することで高品質な特性を維持する一方、伝送遅延が大きく、帯域幅、遅延の変動がランダムに発生することが特徴として挙げられる。また無線チャンネルの回線制御や電波品質の変動により、突発的な遅延の増加(delay spike)が発生することが観測されている。IMT-2000 パケット網では、トランスポート層に TCP を移動通信向けに最適化した W-TCP[2,3,4]を採用している。TCP は再送制御、輻輳制御など高品質なデータ転送を実現する機能を有するが、移動通信特有の delay spike が生じた場合、再送タイムアウト(RTO)の発生により不要なセグメント再送(スプリアタイムアウト再送)が発生するとともに、不要な輻輳制御により伝送効率の低下が生じてしまう。

IETF においては、スプリアタイムアウト(STO)の対策技術が提案されており、その 1 つに RFC4138[5]として F-RTO[6]が標準化されている。F-RTO は送信側に実装し再送手順を改善することで STO の検出を可能とし、不要なセグメント再送を最小限に抑えることができる。また STO 検出後の応答方式としては、RFC4015[7]として Eifel Response が標準化されている。Eifel Response は STO を検出した際に、不要な輻輳制御を回避する方法を規定している。

本稿では、STO の検出、応答方式として F-RTO と Eifel Response に着目し、基本的な通信モデルによる数値解析により両方式の性能を明らかにした上で、両方式を IMT-2000 パケットの実網に適用し、実際のサービス環境下での有効性を明らかにした。

2. IMT-2000 パケットの回線特性

IMT-2000 パケットのユーザーチャンネルは、共通チャンネルと個別チャンネルに大別される。共通チャンネルは狭帯域の伝送チャンネルを複数ユーザで共有し、個別チャンネルは最大 384kbps の伝送

チャンネルを 1 ユーザで占有する。転送データ量が少ない状態では共通チャンネルを利用し、データ転送量が増加し閾値を超えると、個別チャンネルに遷移し高速データ転送を行い、無線チャンネルの利用効率を向上させている。Layer2 プロトコルには RLC[8]を適用し無線区間の誤りを再送制御によって回復し、上位層のプロトコルにエラーフリーの通信環境を提供する。

これらの電波資源を効率的に利用し、かつ高品質な回線を提供する仕組みを有する一方、無線チャンネルの制御や電波の品質の変動により、回線特性が動的に変動することが観測されている。無線チャンネルの制御に起因する影響として、共通/個別チャンネルの遷移および、ハンドオーバーが挙げられる。チャンネル遷移では、データ転送の初期に、遷移の瞬間に数十 ms から数 s 程度の delay spike が発生する。ハンドオーバーでは、セルを切り替える際に、データ転送中ランダムに delay spike が発生する。電波品質に起因する影響としては、エリア端等で電界強度が弱くなると、RLC 再送により遅延が増加する。また、移動局がトンネルやビル影に入り一時的に電波が到達しなくなり、再度復帰した場合にも delay spike が発生する。この時の delay spike の継続時間は移動局の環境に依存し、予測不可能である。また、RLC 再送がタイムアウトした場合やハンドオーバーの際に、パケットロスを伴う場合があり通常の RTO と STO の判別を困難にしている。この delay spike の発生が、TCP における STO を発生させる要因となり、通信品質の劣化の原因となる。

3. スプリアタイムアウトの影響

TCP は RTT (Round Trip Time)を監視し、RTO タイマを常に最適化している。STO は delay spike により、RTO タイマの追従範囲を超え、本来不要な再送が発生する現象を示す。この際、送信側は Go-Back-N 再送により、輻輳ウィンドウ(cwnd)分のセグメントを全て再送し、受信側では、オリジナルセグメントを受信したにも関わらず、同一のセグメントを重複して受信してしまう。加えて、送信側では RTO の発生により伝送路上に輻輳が発生したものとみなし、cwnd を 1 に減少させ、Slow Start Threshold (sssthresh) を直前の cwnd の半分に減少させる。cwnd はスロースタートにより、sssthresh まで指数関数的に増加するが、それ以降は輻輳回避により線形的

に増加する．再送動作終了後， $cwnd$ は STO 発生前の半分に制限される．これらの輻輳制御は，STO の場合はパケットロス，輻輳ともに発生しておらず不要な制御である．

4. F-RTO と Eifel Response

4.1 アルゴリズムの選定理由

STO 検出，応答アルゴリズムは複数提案されているが，本稿では F-RTO と Eifel Response を選択した．検出アルゴリズムの選択肢として，Eifel Detection Algorithm[9]や DSACK[10]等が存在するが F-RTO は Timestamp Option により TCP ヘッダに余分なデータを付加しない，送信側の実装のみで動作可能である，標準化済みの技術である，等の利点があることから本アルゴリズムを採用することとした．応答アルゴリズムの選択肢として，通常の TCP の輻輳制御，RFC2861[11]に基づく輻輳制御などが存在する．本稿では，モバイルパケット網で STO が発生する状況は，輻輳ではなく無線区間の一時的な品質劣化であり，短期間で回復するとみなし，不要な輻輳制御を行わない Eifel Response を選択することとした．

4.2 アルゴリズムの動作

F-RTO は，RTO が発生した際の再送手順を改善し STO の検出を行う．F-RTO は，セグメントを送信し Ack 受信前に，RTO タイマが経過した際，まず通常の TCP と同様に $cwnd$ を 1 に減少させ，Ack が未受信となったセグメントを再送し Ack の受信を待つ．Ack 受信後，新たに後続の未送信の 2 セグメントを送信し，Ack の受信を待つ．その後受信された Ack が RTO 発生前に送信したセグメントの応答であれば，STO と判断しその後の再送動作を行わない．Ack が重複 Ack だった場合は，通常の RTO 動作を行う．STO が検出された場合，Eifel Response により $cwnd$ を STO 発生時の値まで戻し，未送信セグメントの送信を継続する．

5. 数値解析

5.1 解析モデル

STO により不要に再送されるデータ量とスループットの減少は， $cwnd$ に依存し， $cwnd$ は輻輳制御によって調整される．ここでは，F-RTO と Eifel Response の性能を， $cwnd$ の振る舞いに

よりモデル化を行った．実環境での性能は，通信中に何度 STO が発生するかに依存するが，これは端末の移動，電波品質等に依存しモデル化が困難である．

図 1 は， $cwnd$ の振る舞いを示す． $cwnd$ w は初期ウィンドウ w_0 から指数的に増加する． t_s において，継続時間の delay spike により STO が発生する．STO が発生した後，F-RTO と Eifel Response を利用した場合，STO が発生した $cwnd$ w_s から指数的に w_{max} まで増加する． w_{max} は帯域幅遅延積 c に等しいとする．F-RTO と Eifel Response を利用しない場合， $cwnd$ はスロースタートによって $w_s/2$ まで指数的に増加し，その後輻輳回避により線形的に w_{max} まで増加する．ただし，delay spike の発生直後に，直前の $cwnd$ 分の Ack が受信されるため， $cwnd$ が $w_s/2$ に達するまでの時間は非常に短く，この期間のスループットへの影響は小さいと考えられる．本モデルでは，この期間の動作は考慮せず， $cwnd$ は $w_s/2$ から線形的に増加するものとした．

今回は本モデルにおいて，スロースタート中の，どの時点で STO が発生したかに着目して数値解析を行った．STO 発生モデルとして，スロースタートの初期，中盤，終盤にそれぞれ STO が発生したと仮定した．

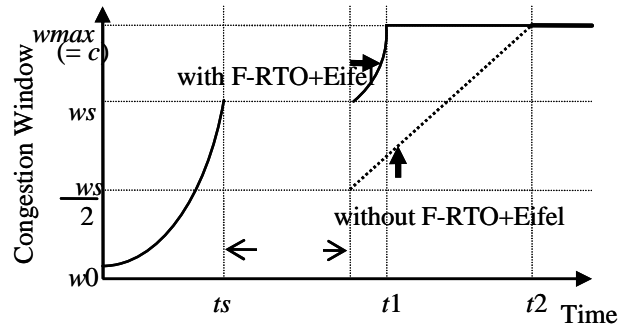


図 1 . $cwnd$ の振る舞い

5.2 解析結果

STO による不要再送数を R ，無線帯域幅を b_{max} ，RTT を d とすると， R は式(1)によって与えられる． r はスロースタート中の RTT ごとの $cwnd$ の増加率を示しており，delayed Ack 利用で 1.5，delayed Ack 利用無しで 2 となる．

$$R = \begin{cases} 1, & \text{(with F-RTO and Eifel Response)} \\ \min(w_s, w_{max}) = \min(w_0 r^{t_s-1}, b_{max} d) & \text{(without F-RTO and Eifel Response)} \end{cases} \quad (1)$$

次に、F-RTO と Eifel Response の有無によるスループット比を算出する。Dbyte のデータ転送を行った際の、スループット比 T は D の値によりそれぞれ式(2),(3),(4)で示される。

$$1) D_s \leq D < D_1$$

$$T = \frac{2m(t_s + t) - w_s + \sqrt{w_s^2 + 8m(D - D_s)}}{2m\{t + \log_r\left(\frac{D(r-1)}{w_0} + 1\right)\}} \quad (2)$$

$$2) D_1 \leq D < D_2$$

$$T = \frac{c\{2m(t_s + t) - w_s + \sqrt{w_s^2 + 8m(D - D_s)}\}}{2m\{ct_1 + D - D_1\}} \quad (3)$$

$$3) D_2 \leq D$$

$$T = \frac{ct_2 + D - D_2}{ct_1 + D - D_1} \quad (4)$$

ここで、 m は輻輳回避中の RTT ごとの cwnd の増加率を示し、delayed Ack 利用の場合 0.5、delayed Ack 利用無しの場合 1 となる。 D_s, D_1, D_2 はそれぞれ、STO が発生した時点 (t_s)、スロースタートによって cwnd が w_{max} に達した時点 (t_1)、および輻輳回避により cwnd が w_{max} に達した時点 (t_2) までのデータ転送量を示し、それぞれ式(5),(6),(7)で与えられる。

$$D_s = \frac{w_0 (r^{t_s-1})}{r-1} \quad (5)$$

$$D_1 = \frac{rc - w_0}{r-1} \quad (6)$$

$$D_2 = D_s + \frac{1}{2m} \left(c^2 - \frac{w_s^2}{4} \right) \quad (7)$$

図 2,3,4 に転送速度が 384kbps, 2Mbps, 5Mbps, 14Mbps の場合のスループット比の数値計算結果を示す。それぞれ、スロースタート中の、初期 $w=3$ (図 2)、中盤 $w=c/2$ (図 3)、終盤 $w=c$ (図 4) で STO が発生した場合の結果を示す。ここでは、 d を 500ms, MSS を 1460byte, w_0 を 4380byte としている。

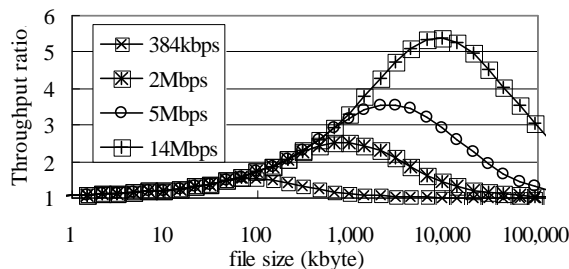


図 2 . スループット比 (初期)

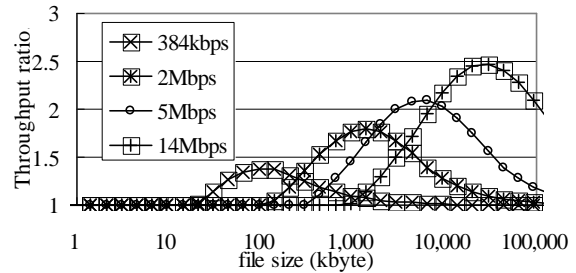


図 3 . スループット比 (中盤)

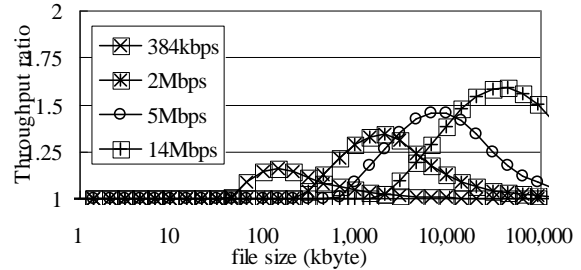


図 4 . スループット比 (終盤)

6. IMT-2000 実網での評価

6.1 測定環境

本稿では、移動通信環境下での F-RTO と Eifel Response の性能評価を IMT-2000 パケットの実網で実施した。サーバー側には、F-RTO と Eifel Response を実装した UNIX サーバーを、Internet 経由で IMT-2000 パケット網に接続した。クライアント側には、PCMCIA 型のデータ通信カードを PC に実装し、IMT-2000 パケット網および Internet を経由しサーバーに接続した。サーバー、クライアントには、ともに W-TCP のプロファイルを適用した。この環境における無線帯域幅は、最大上り 64kps, 下り 384kbps である。

測定条件としては、実際のユーザの利用環境および利用コンテンツ毎の効果測定のため、移動環境として、固定環境(弱電界, 強電界), 低速移動(歩行者), 中速移動(自動車), 高速移動(特急電車)の 5 種類の環境で、コンテンツとして、6kbyte, 18kbyte, 300kbyte, 2Mbyte の 4 種類を用意した。コンテンツは、それぞれメール受信, Web アクセス, 動画閲覧を想定している。高速移動の測定では、試行回数, 測定時間の制限により 500Mbyte のファイルの連続ダウンロードにより測定を実施した。

7. 測定結果

7.1 実環境における測定結果

本項では IMT-2000 パケット実網における、STO 再送発生頻度、STO による不要再送数、スループット改善効果の測定結果を示す。

図 5 に各移動環境下での STO の発生頻度を 1Mbyte あたりの STO の発生数として示した。最大値は、高速移動環境の 0.36 回/MB で、最小値は固定環境(弱電界)の 0.18 回/MB となった。固定環境では弱電界よりも強電界のほうが STO の発生頻度が高くなる結果となったが、弱電界では RLC 再送の増加により RTT が恒常的に長くなるため、それに追従し RTO タイマが長くなることで、delay spike が発生しても RTO タイマを超過することが減少したためと考えられる。

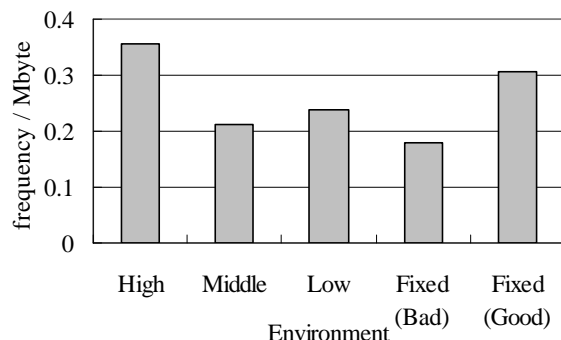


図 5. スプリアス再送発生頻度

図 6 に移動速度別の不要再送数を示す。高速移動では、大容量ファイルの連続データ転送のため、cwnd が最大値となる期間が長く、STO が発生した際に最大ウィンドウサイズに近い量の不要再送量が発生しているものと考えられる。他の移動環境では、中速移動環境が最も不要再送数が小さい結果が得られており、移動速度との相関が得られない結果となった。不要再送数は F-RTO の利用により全移動環境において 0.1% 未満に低減することができた。

図 7 にコンテンツサイズ別の不要再送数を示す。ここでは STO の原因となった 1 パケットによって、何パケットが不要再送となったかの平均値を示している。F-RTO を用いない場合は、不要再送数は STO が発生した際の cwnd の大きさに比例するため、2Mbyte のコンテンツの場合が最も大きくなった。F-RTO を利用した場合、全コンテンツサイズにおいて、不要再送数の平均値が 1 パケット未満に低減することができた。

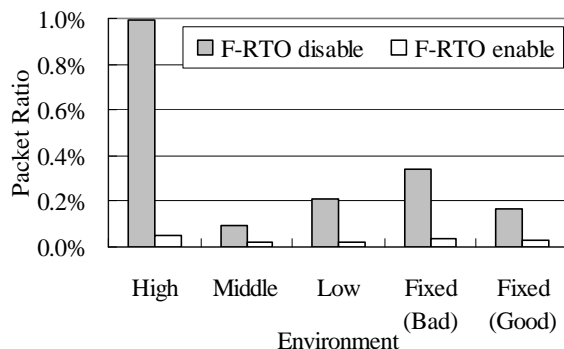


図 6. 不要再送比 (移動速度別)

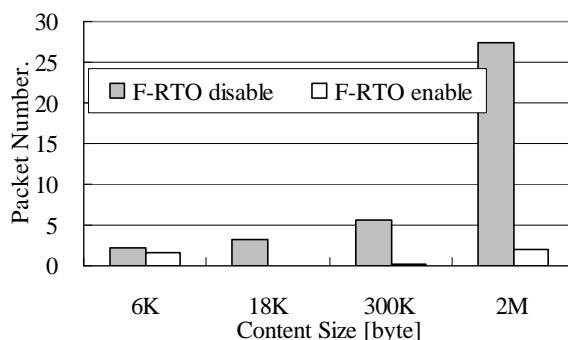


図 7. 不要再送比 (コンテンツサイズ別)

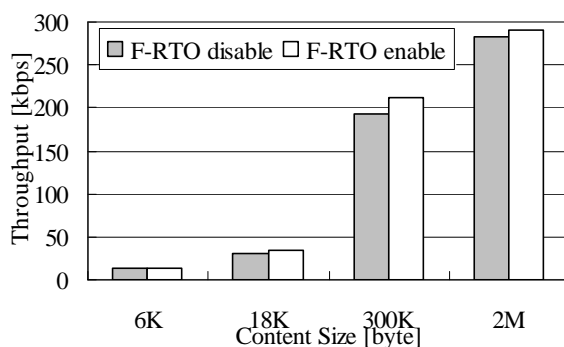


図 8. スループット

図 8 にコンテンツサイズ別のスループットを示す。6kbyte のコンテンツでは、スロースタートの影響により cwnd が小さく抑えられているため、Eifel Response の利用による改善効果は限定的となった。18kbyte 以上のコンテンツにおいては、2% ~ 12% 程度の改善効果が得られた。

7.2 数値解析結果と実測地の比較

図 9 は 5 章で行った数値解析結果と実環境での測定結果の比較を示す。比較対象としては、実環境での測定で、最も多くのサンプルが得られたスロースタート初期のデータとしている。両者の比較において数値解析結果と実測値の改

善傾向が一致した結果が得られたが、18kbyte、300kbyte の効果において 0.5 から 0.9 の差分が発生した。

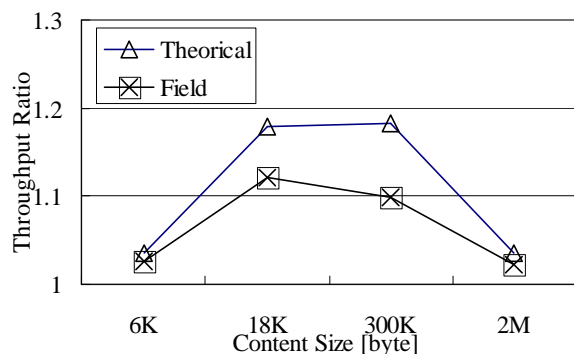


図 9. 数値解析結果と実測値の比較

7.3 F-RTO で STO が検出不能なケース

実環境での測定の結果、全 STO のうち 71% が F-RTO によって検出されたが、残りの 29% については検出不能であった。29% の内訳を表 1. で示す。事象としては、STO が発生したが、送信すべきデータが全て受信側に到達し、FIN が送信されたケースが 28%、STO が発生し F-RTO の動作に入ったが、送信ウィンドウに空きがなく、新たなセグメントの送信が不可能だったケースが 0.7%、RTO 発生後、重複 Ack を受信し F-RTO が動作しなかったケースが 0.3% となった。

表 1. STO が検出不能なケース

STO発生後FINで終了	28%	合計 29%
STO発生後Windowの空きが なかった	0.70%	
Timeout後のDup-Ack受信	0.30%	

8. むすび

本稿では、モバイルパケット網で発生する STO の対策として、F-RTO と Eifel Response に着目し、IMT-2000 パケット網に適用した際の性能を数値解析と、実環境での効果測定の両面から評価を行った。

数値解析においては、スロースタート初期において STO が発生した場合に、F-RTO と Eifel Response によるスループット改善効果が最も高いことが分かった。また、特に将来的に HSDPA 等により無線帯域幅が拡大された環境で高い効果が得られ、帯域幅 14Mbps で 10Mbyte のデータ転送を行った際に約 5.4 倍の改善効果が得ら

れることがわかった。実環境においては、IMT-2000 パケット網で発生する STO の発生頻度は、1Mbyte あたり 0.18 回から 0.36 回であることを明らかにし、F-RTO を適用することにより、STO によって発生する不要再送数をパケット比率で 0.1% 未満に低減する事を確認した。スループットにおいては、Eifel Response により最大 12% の改善効果が得られ、数値解析結果と実測値の比較から同様な改善傾向が確認できた。しかし、18kbyte、300kbyte の領域において、改善比率の値に差分が確認された。これは数値解析と実環境の、無線帯域幅の実効値や電波環境等の条件が異なっただけが要因として考えられる。また、実環境において STO の発生頻度はスロースタート初期に集中していることが確認された。スロースタート初期に発生する要因として、個別/共通チャネルの遷移が予測されるが、原因の特定については今後の課題としたい。

文 献

- [1] 3GPP, TR25.848, "Physical Layer Aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access"
- [2] H.Inamura, T.Ishikawa, "A TCP profile for W-CDMA: 3G wireless packet service.", draft-inamura-docomo-00.txt, July, 2000.
- [3] H.Inamura et al., "TCP over Second (2.5G) and Third (3G) Generation Wireless Networks", RFC3481, February, 2003.
- [4] 石川, 稲村, 高橋, "W-CDMA 向け TCP プロファイル", 情報処理学会研究報告 Vol.2000No.112(2000)
- [5] P. Sarolahti, M.Kojo, "Forward RTO-Recovery (F-RTO): An Algorithm for Detecting Spurious Retransmission Timeouts with TCP and the Stream Control Transmission Protocol (SCTP)", RFC4138, August, 2005.
- [6] P. Sarolahti, M.Kojo, K.Raatikainen, "F-RTO: An Enhanced Recovery Algorithm for TCP Retransmission Timeouts" ACM SIGCOMM Computer Communication Review vol.33, no.2, pp.51-63, April, 2003.
- [7] R. Ludwig et al., "The Eifel Response Algorithm," RFC4015, February 2005.
- [8] 3GPP, TS25.322, "Radio Link Control (RLC) protocol specification"
- [9] R. Ludwig and M. Meyer, "The Eifel Detection Algorithm for TCP," RFC3522, April, 2003
- [10] E. Blanton and M. Allman, "Using TCP Duplicate Selective Acknowledgement (DSACK) and Stream Control Transmission Protocol (SCTP) Duplicate Transmission Sequence Numbers (TSNs) to Detect Spurious Retransmissions," RFC3707, February, 2004.
- [11] M. Handley et al., "TCP Congestion Window Validation" RFC2861, June, 2000.