

VoIPを現実にする通信インフラ技術

— QoSを含むVoIPのためのルータ技術 —

砂田 和洋 シスコシステムズ(株) ksunada@cisco.com

◆VoIPを実現する網が備えるべき技術◆

音声はIP網に載せ違和感なく相互に会話を行うために音声信号のデジタル化や任意の帯域への圧縮化、パケット化を行うDSP (Digital Signal Processor) は非常に重要なキーテクノロジーの1つである。エコー処理や、途中経路の輻輳によって揺らいで到着したVoIPのパケットを定期的に再生しつつ、揺らぎを吸収するパケットバッファをいかに最適化するかによって、話者に与える印象は大きく変わる。これらの技術はパケットの遅延や揺らぎを最終的には保証できないインターネット上にVoIPを通すというチャレンジのもとで飛躍的に発達している。

しかしながらビジネス会話を行う、あるいはサービスを供給するという観点からVoIPを考えた場合、これらエッジのVoIPゲートウェイだけの技術ですべてを解決することは不可能であり、QoS (Quality of Service) から逃げることはできない。この2つのキーテクノロジーが融合することで初めて、VoIPが現実のものとなる。

本稿では特に通信インフラ技術であるQoSに焦点をあててその技術と適用範囲について解説を行うこととする。なお、以下に述べている技術のうち、キューイング機構については各ベンダ固有のインプリメントを行っているものであり、本稿ではCiscoのルータに関しての説明になっていることに留意願いたい。本稿ではその機構が必要になる背景をできる限り解説しているので、他ベンダの機構を調べる際にも参考になるはずである。

◆遅延と揺らぎを最小にする◆

会話というものが実質的に半二重通信であり、片方向の伝送遅延が150～200msを超えるとそのタイミングは取りづらくなることはよく知られている。したがって、網内の遅延を含んだ片道の遅延(音声波形入力から受信側での出力まで)を200ms以下に抑えることのできるQoS技術がVoIPでは必須となってくる。

次に遅延の絶対量ではなく、パケットの到着間隔に着目してみる。音声のパケットは代表的な圧縮方法であるG.729という8Kcodecを使用した場合、発側GW(ゲートウェイ)では20ms間隔で20Byte (IP/UDP/RTPヘッダが別に40Byte必要)のVoIPパケットが送出されている。EthernetやWANの媒体を通して着側GWに到達するまでに輻輳している区間を通過するなど、そのパケットの到着間隔は大きく揺らぐ可能性がある。前章で触れたDSPではその揺らぎを吸収するための揺らぎ吸収バッファを固定長あるいは可変長で持っている(揺らぎが安定している網ではそのバッファの深さは40～60msで安定する)が、揺らぎの大きな網の場合にはバッファを深くせざるを得ず、そのためにトータルの遅延が増大してしまうという影響が出る。つまりVoIPを実現するためにはVoIPのパケットを遅延なくキューイングして、その揺らぎを最小にすることが肝要である。また、再生すべきVoIPのパケットがなくなり、無音や雑音が発生することを防ぐために、その揺らぎは平均値だけではなく、最大値も低く抑えられなければいけない。データ系ではスループットやレスポンスが重要であるが遅延時間の変動は大きな問題にならない。一方VoIPでは平均的な遅延時間だけでなく、到着間隔の変動幅にも十分な注意を払わなければ

- Congestion Management
 - FIFO
 - Priority Queuing (PQ)
 - Custom Queuing (CQ)
 - Weighted Fair Queuing (WFQ)
 - Class Based WFQ (CBWFQ)
 - Low Latency Queuing (PQ+CBWFQ)
- Policing and Shaping
 - Committed Access Rate (CAR) Rate Limiting
 - Generic Traffic Shaping (GTS)
 - Frame-Relay Traffic Shaping (FRTS)
- Classification
 - IP Precedence
 - Policy based Routing
 - Committed Access Rate (CAR) Packet classification
- Signaling
 - RSVP and IP Precedence
- Congestion Avoidance
 - Weighted Random Early Detection (WRED)
- Link Efficiency Mechanism
 - Link Fragmentation and Interleaving (MLPPP, FRF.12)
 - IP RTP header-compression (cRTP)

図-1 QoS技術の分類

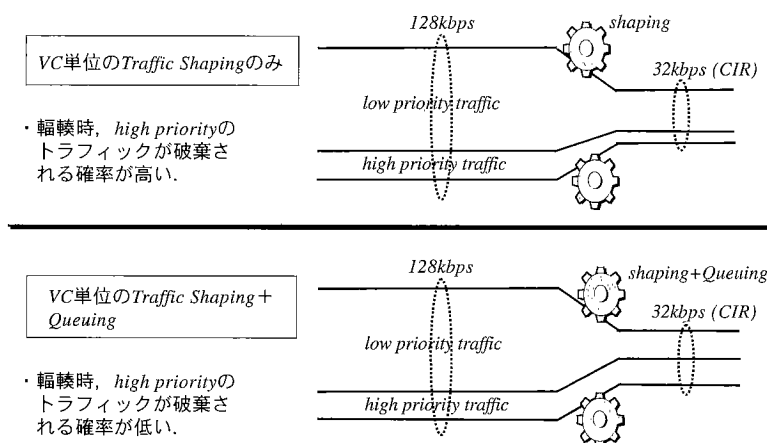


図-2 シェーピング&キューイング

ばならない点で、データ系と特性が異なっている。

◆QoS (Quality of Service) 技術の分類◆

一言でQoSといってもその技術はさまざまである。

図-1にその技術を分類した。また、QoSの技術の適用に関しては使用する網の種別、利用ユーザに対するQualityサービスの考え方、使用するスピード領域などによって使い分けが必要であり、また、多くの場合はパフォーマンスなどとのトレードオフが発生する。

■キューイング

QoS=キューイングと考えている人が圧倒的に多い。それほど、ある決められた順序でパケットをinterfaceに送出するというこの機構は重要な技術である。

Ciscoのルータではこのキューイング機構は、送出interfaceごとに設けられたOutputキューであるTX-queueがいっぱいになった時点で動作し始める。逆にいえばTX-queueがいっぱいにならない限りキューイングは動作せず、FIFOといわれるファーストイン・ファーストアウトの先入れ先出しの機構が、interfaceが輻輳するまでの間は動作している。この機構は輻輳が発生していない状態では最も遅延が発生しないものである。2Mbps以下

のスピードではこのTX-queueは2個に設定されており高速になればなるほど、深く設定される。

その他にキューイング機構が動作する条件としてはシェーピング^{★1}がある。フレームリレー（以下FRと略す）やATM、Ethernetのようなマルチアクセスの環境下でキューイングを行う場合、シェーピングの機構とキューイングの機構が同時に連携して働くことで初めて効果が出るためである（図-2参照）。FR、ATMを使用してQoSを動作させる場合はFRならばframe-relay traffic shapingを、ATMならばvbr-rt/nrtなどの使用を推奨しているのはこのためである。

キューイングの技術は表-1に示すとおりFIFO以外に多数あるが、現在、VoIPパケットを確実に優先でき、データ系のトラフィックを重要度に応じてさらに柔軟にキューイングする機構はLow-Latency-Queuing（以下LLQと略す）である。この機構は以下の点で他のキューイング機構より柔軟性に富んでおり、interfaceに求められるキューイングの要件をほとんど満たせるようになっている。

- 1つの物理（または論理的な）interfaceに与えることができるキューイングのポリシーは複合させることが可能。
- きめ細かく高速なパケット交換を実現するCisco Express Forwarding (CEF) と連携するため、高速なinterface上でも動作させることが可能。

★1 トラフィックシェーピング (Traffic shaping), トラフィックフロー制御技術の1つ。ネットワークで輻輳を引き起こす可能性のある大量のトラフィックを、キューを使って制限するフロー制御技術。データはいったんバッファに蓄積され、特定の接続で許可されているトラフィック量を超えないだけの量に調整された後に、ネットワークに向けて送出される。トラフィックシェーピングは、ATM、フレームリレーおよびその他のネットワークで使われる。

	PQ	CQ	WFQ	PQWFQ	CBWFQ	LLQ (PQ-CBWFQ)
Classification	Protocol, interface	Protocol, interface	IP Prec, RSVP, RTP Reserve, protocol, port	VoFR and IP RTP Priority	Any (Mod CLI)	Any (Mod CLI)
#queues	4	16	Per flow	1PQ+WFQ	64 classes	1PQ+CBWFQ
Scheduling	Strict priority	Round-robin	Fair (weight, arrival time)	PQ: Strict WFQ: Fair	Fair: weight and BW	PQ: Strict CBWFQ: Fair/BW
Delay guarantee	Yes	No	No	Yes	No	Yes
BW Guarantee	No	No	No	PQ: Yes WFQ: No	Yes	Yes
Used for Voice	No	No	Last resort	Yes	No	Yes

表-1 キューイングサマリー

一昔前のデータ通信では、レスポンス、スループットを確保すべき通信とそうでないものが明確に分かれていた。その場合、たとえばPQと呼ばれる4段階に分けられたキューイングで優先させたり、あるいはCQと呼ばれる最大16のクラスに対してそれぞれのクラスごとのパケット送出比率を決めて輻輳時でもある一定の送信帯域を確保できるキューイングを採用すれば、ほとんどのユーザで満足のいく運用が可能であった。

一方、ISPでは速度見合いで料金格差はつけるものの、同一契約条件のユーザには等しく通信する機会を与えるべきであるというサービスポリシーと、その上で対話型の通信 (telnetなど) にはある程度の優先を行いたいというニーズからWFQと呼ばれるプロトコルが採用された。WFQは対話型のプロトコルとパケット長に対して重みは付くものの、各データフローには原則的に平等 (Fair) な送信機会を与える機構であり、ニーズに合ったものであった。

しかしながら現在のデータ通信ではmailやWebアクセスも重要な通信としてその地位を固め、かつ、従来どおりのミッションクリティカルな通信も残り、その上で遅延、揺らぎに最もシビアなVoIPを載せるというチャレンジが行われている。LLQは別名、PQ+CBWFQと呼ばれており、絶対的に優先すべきVoIPをPriority Queue (PQ) に入れ、それから残った帯域をClass-based Queue (CBQ) と呼ばれる、あらかじめ設定した帯域比率で優先をする機構が使い、さらにその残りをWFQがある程度フェアに使用できるものであり、複雑化したニーズを満たすことができるようになっている。

◆ LLQ (Low-Latency-Queuing) の動作 ◆

それではLLQの動作をVoIPを使うことを前提に解

説する (LLQの概要は図-3参照)。

LLQではまずフローごとの分類がアドレス、プロトコル、port番号、アクセスリスト、IP Precedence bit, DSCP (differentiated services code point) などによって行われる。そしてそのフローは

- a) Priority
- b) Class (最大64個までのコンフィグ可能)
- c) それ以外

に分類されてQueueに並ぶ。そのとき、すでにDe-queue (キューイングされたDataを取り出す仕組み) の先にあるTX-queueがパケットで満たされている場合には、キューイングが必要なので、De-queueではそのフローを以下のルールによって取り出し、TX-queueに送り出す。

- (1) a) のpriorityのフロー (VoIP) を最優先で取り出す。
- (2) b) の複数のclassの間で、以下のルールにしたがって、パケットをDe-queueに送り出す順番を決める (Scheduling)。
 - Classに定義された帯域幅、あるいはpercentの比率でそのクラスの重みが決定される。
 - その重みに応じて取り出すべき帯域の比率が決まる。
 - 定義されたClassにキューイングされたパケットがない場合にはそのClassはスキップされる。
- (3) c) その他、(1)、(2) に分類されなかったパケットはWFQとしての重みが付けられる (その重みは(2)と比較して3桁程度軽くなっている) ☆2。そして、そのパケットは(2)のClassと同じく重みに応じてDe-queueに送り出す順番が決められる。
- (4) 低速な回線で後述するfragment & interleaveが設定されている場合には、a) のパケットは、すでにDe-queueによってTX-queueに送りこむことがスケジュールされフラグメントされて送出中である他のデータパケットがあっても、そのフラグメントされたパケット間に差し込まれ (interleave) 優先して送出さ

☆2 c) に対してWFQではなくFIFOとして扱う代わりに、Class-DefaultというClassを作った上で帯域幅あるいはpercentを定めることで、そのClass-Defaultの優先度を上げることも可能である。

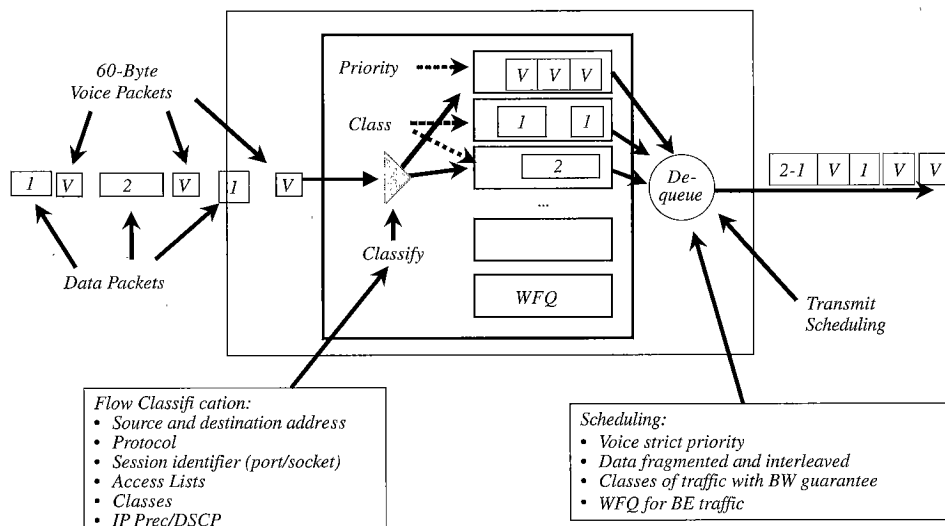


図-3 Low Latency Queuing (LLQ)

れる。その結果低速な回線でも VoIP に必要な短い遅延と安定したパケット送出間隔が確保される。

上記の通り動作することでいかなる条件下でも PQ (Priority Queuing) に入った VoIP のパケットが優先されるメカニズムを LLQ は備えており、かつ、ミッションクリティカルなアプリケーションのスループット、レスポンスを保護し、さらにそれ以外の各フローに対して公平 (Fair) な扱いをすることができる。

この LLQ は ATM、専用線、FR で使用することが可能であるが、低速な専用線と FR には別途考慮しなければいけない要素があるので、後の章でさらに詳しく解説する。なお、表-1 の中に PQWFQ、CBWFQ とあるのは前記 a) = PQ, b) = CBQ, c) = WFQ の組合せを表しており、重複するので説明は割愛する。

◆低速専用線網と Fragment & Interleave◆

768k 以下の低速な専用線では、デフォルトで 2 個ある TX-queue とシリアルライゼーションディレイという 2 つの要素から Fragment & Interleave という技術が、通信インフラであるルータに求められる。

128kbps の専用線を例にとりて解説する。128k の回線上にパケットを送出しようとするルータで発生する遅延の最大値は、TX-queue に 1,500Byte 長のパケットが 2 個存在する場合を想定すればよく、 $1,500\text{Byte} \times 8 / 128,000\text{bps} \times (\text{パケット数}) = 188\text{ms}$ である。もちろん音声通信が始まれば 20ms ごとに送出される VoIP パケット (60Byte) の比率が高くなるため、通話中の最悪値は $(1,500\text{Byte} + 60\text{Byte}) \times 8 / 128,000 = 98\text{ms}$ になるが、先に説明した 200ms 以下の片道遅延や揺らぎを小さく抑えるという点から考えてこれでは不十分であることは明らかである。そのため低速な専用線を使用する場合には Multilink PPP (MLPPP) を専用線間に作った仮想 interface 間で実行し、

データパケットを 2 層で細かく分け、その間に最優先である VoIP パケットを差し込む (interleave) 処置が必要となる。

ATM に関しては 2 層で 53Byte に細かく分けられているので問題ないと考えられる方が多いが、日本における ATM 専用線サービスの仕様、料金から、拠点間の VC が 1 本のみであるケースがほとんどであり、その場合、ATM の VC が 1.0Mbps 以下の低速の場合には同様な問題が発生する。なお、この問題に関しては MLPPP over ATM など、ATM 上でも 2 層の Fragment & interleave の方式を使い、低速専用線と同様に遅延を最小化することが望ましい。

◆FR 網と Dual-FIFO Queue◆

■低速な FR 網

低速な FR 網に関しては前章と同じ問題があるが、FR では FRF.11/12 という、本来は VoFR 用に定められたフラグメントの規格を VoIP にも適用して問題を解決しているベンダが多い。Cisco も同様であり、その場合の優先動作は基本的に前章の MLPPP での動作と同じである。それ以外に注意・解決すべき問題を公衆 FR 網で HUB & SPOKE の構成を例にとりて解説する。

■FR 網で VoIP を実現するための課題

- (1) 統計多重の効果を期待してセンター (あるいは本社) 側の回線速度を、リモート (あるいは支店) の Total の回線速度の 1/2 から 1/3 にしているため、すべてのリモートから同時にトラフィックが発生すると、センター側のキャリアの FR 交換機でのパケット滞留または破棄が発生し音質が劣化する。
- (2) センターは 1.5Mbps、リモートは 128kbps という異速度の対向が一般的で、センター側速度でパケットを送

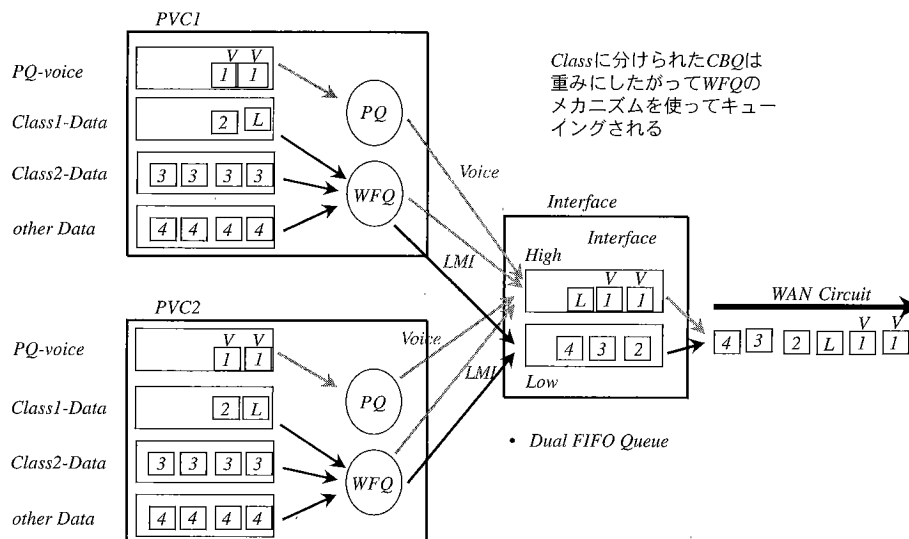


図-4 LLQ on FR PVCs

出すると低速なリモート側のキャリアのFR交換機でパケット滞留または破棄が発生し音質が劣化する。

- (3) 多数のVCを束ねたセンター側で、各VC単位にはキューイングでQueueの先頭に並んだVoIPパケットが、他のVCのトラフィック処理の待ちを待たされ、その結果遅延する。

■解決方法

(1) に関してはQoSのないFR網での特性的な問題であり、発生確率を0にするには、リモート回線速度の和＝センター側の速度にする他はない。一方、(2)、(3)はルータ内部で対応できることであり、(2)に対しては高速側から低速側へのシェーピング速度を低速側に合わせることで回避できる。(3)に関しては各VCからパケットを取り出す間隔を短く(VoIPの送出間隔である20ms以下が望ましい)することである程度回避できる。

Ciscoのルータではそれ以外に、図-4のようにHigh/Lowのpriorityが付けられたDual-FIFO Queueというものをさらに用意し、Highに入るVoIPはLowのQueueにどれほどパケットがあっても最優先で送出することでこの問題を解決している。

■RSVP

RSVPはサポートしていないベンダも多くVoIPに関しては必須ではないが、呼量を制限することが容易ではないVoIPで、Call signalingと連動させて、帯域を確保できない場合にbusy toneを発生させて、結果的に呼量を制限することも近年試みられている。

◆トレードオフとネットワーク設計◆

VoIPを現実にするには上記の音声品質を守る機能だけでは十分でない。

- (1) 回線の帯域を有効に活用するために、低速な区間ではVoIPのIP/UDP/RTPの計40Byteのヘッダを圧縮するヘッダ圧縮機能はよく使われているが、この機能を使用したがためにルータのパフォーマンスが極端に低下してはならない。
- (2) 非常に高速なinterfaceでキューイングを動かしたことによってルータの負荷が増大し、よりハイパフォーマンスなルータにアップグレードにしなければならないといったこともできる限り避けなければならない。

上記(1)に対してはルータの処理ロジックの変更によってパフォーマンスの向上を図ったり、(2)に対してはキューイングをやめ、優先度の低いパケットを適度に落として当該フローのスロースタートを促すWRED (Weighted Random Early Detection) というメカニズムで、輻輳そのものの発生を低く抑えるなどの回避策がある。しかし、たとえば後者の場合であると、パケットを落とされたフローの通信は結果として再送が発生し、そのフローのスループットは低下するという新たなトレードオフが発生する。

実際のネットワーク設計では、どの技術を選択するかと、それによって生じるトレードオフならびにその解消・緩和策を検討した上で行わなければならない。本稿が通信インフラを構築する方の参考になれば幸いである。

(平成12年12月12日受付)

