

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20300021

研究課題名（和文）インターネット高親和型次世代マルチレイヤ衛星ネットワークに関する基盤研究

研究課題名（英文）Research on Next Generation Multi-Layered Satellite Network Highly Compatible with Internet Protocol

研究代表者

加藤 寧（KATO NEI）

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：00236168

研究成果の概要（和文）：

本研究では、異なる衛星ネットワークの複合体である次世代マルチレイヤ衛星ネットワークを対象とし、IP パケットベースの通信を行うために必須となる基盤技術を確立することを目的とした。ネットワークリソースを効果的に利用しつつ各ユーザの通信品質を保証するためには、パケットの転送経路を適切に決定する必要があり、そのためのルーティング技術やハンドオーバー技術を考案し、シミュレーションによりその有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we focus on the next generation Multi-Layered Satellite Network (MLSN), which consists of different types of satellite networks. To achieve both efficient utilization of network resources of MLSNs, and to guarantee each user's quality of service, we developed an intelligent routing technology which can effectively distribute traffic load among satellites and layers. The results of performance evaluation based on network simulation show that the proposed scheme can achieve highly efficient network utilization, and mitigate the increase of packet drops and transmission delays.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総 計	5,600,000	1,680,000	7,280,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：衛星ネットワーク，インターネット，ルーティング，負荷分散，輻輳予測，マルチレイヤ，ネットワークプロトコル

1. 研究開始当初の背景

2000 年代に突入して間もなく、地上系通信ネットワークの急速な高速化とグローバル化に伴い、衛星通信ネットワークの役割は災害時や過疎地への通信サービス提供といった限られたものになりつつあった。しかし、

2008 年 2 月に打ち上げられた超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) に代表されるような衛星通信ネットワークの高速化とインターネットとの相互接続性の向上に向けた研究開発の活発化により、研究開始当初には衛星通信ネットワークの重要性が見直され始めていた。いつでも、どこでも、誰でも

必要な情報にアクセスできるユビキタス社会の実現に向け、衛星通信ネットワークに大きな期待が向けられるようになっていた。そして、次世代の衛星通信ネットワークとして、異なる衛星群を階層的に統合することによって構成されるマルチレイヤ衛星ネットワークに注目が集まり始めていた。

一般に、衛星ネットワークは使用する衛星の高度によって静止 (GEO: Geostationary) 衛星ネットワーク、中軌道 (MEO: Medium Earth Orbit) 衛星ネットワーク、低軌道 (Low Earth Orbit) 衛星ネットワークの 3 つに大別される。各ネットワークは地球全域をカバーするために複数の衛星によって構成される。なお、GEO 衛星は赤道上空の高度約 36,000km に位置し、MEO 衛星の高度は約 10,000~20,000km、LEO 衛星の高度は約 500~1,500km である。次世代マルチレイヤ衛星ネットワークは、広域性や同報性に優れた GEO 衛星ネットワーク、低遅延で移動端末との接続性に優れた LEO 衛星ネットワーク、あるいはその中間的な性質を持つ MEO 衛星ネットワークなどを統合した多階層のネットワークであり、それ故に単独の衛星ネットワークでは実現が難しい課題の解決が可能であると期待される。

2. 研究の目的

次世代マルチレイヤ衛星ネットワークは、各レイヤを構成する衛星ネットワークの特徴を併せ持つが、それは適切な制御技術を伴わなければ諸刃の剣となってしまう。つまり、各レイヤの長所と一緒に短所も内包してしまうため、長所を活かし短所を相殺するための制御技術が必須となる。そこで本研究では、マルチレイヤ衛星ネットワークの特性を十分に活用するために必須となる基盤技術の確立を目的とする。なお、基盤技術としてマルチパス通信技術、ハンドオーバー技術、モビリティ管理技術などについても研究を行ったが、本成果報告書では、基盤技術の中でも特に最重要課題として位置づけられる経路制御技術について重点的に述べる。

次世代マルチレイヤ衛星ネットワークでは、端末から発せられたパケットが複数の衛星を渡って転送される。この場合、接続ごとにあるいはパケットごとにどの経路を辿って転送するかがネットワーク全体のパフォーマンスを左右する。つまり、経路制御技術が大きなカギを握ることになる。

地球上の人口分布は地理的に不均一であることから、当然ユーザの分布も不均一であると考えられる。一方、LEO 衛星ネットワークや MEO 衛星ネットワークは空間的にバランスのとれたメッシュネットワークである。そ

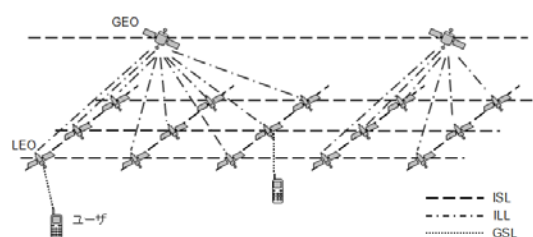


図 1: マルチレイヤ衛星ネットワーク

のため、ユーザが密集している特定の地域の上空を通過する衛星においてトラヒックの集中が発生する一方、海上などユーザ密度が小さい地域の上空に位置する衛星はほとんど使用されないといった現象が起こる。これを解決するためには、混雑している衛星から余裕がある衛星へとトラヒックを迂回させる必要がある。この点、複数の衛星ネットワークの複合体であるマルチレイヤ衛星ネットワークは、そもそも絶対的なネットワーク容量が大きいことから、トラヒックの迂回・分散に向いていると言える。しかし、高度が高い上位レイヤの衛星に迂回させた場合、通信遅延が増加することに注意しなければならない。つまり、ユーザの通信品質 (QoS: Quality of Service) を考慮したトラヒック分散技術の創出が求められる。

3. 研究の方法

本研究ではマルチレイヤ衛星ネットワークとして、主に、GEO 衛星ネットワークと LEO 衛星ネットワークによって構成される 2 階層ネットワークを想定した。これは、GEO、MEO、LEO の中で、GEO 衛星ネットワークが高速大容量通信に最も優れている（トラヒックの分散に最適である）一方、LEO 衛星ネットワークの遅延が最も小さい（通信遅延の抑制に最適である）からである。また、GEO 衛星のカバーエリアが広く、LEO 衛星と GEO 衛星を繋ぐレイヤ間リンク (ILL: Inter-Layer Link) の切り替え頻度が少なく、その影響をとりあえずは考慮しなくても良いことも理由の 1 つである。

図 1 は GEO-LEO のマルチレイヤ衛星ネットワークの概念図である。隣接 LEO 衛星間や隣接 GEO 衛星間など同じ階層の衛星は衛星間リンク (ISL: Inter-Satellite Link) で相互接続される。各 GEO 衛星とカバーエリア内の各 LEO 衛星は ILL によって相互接続され、各 LEO 衛星が同時に接続できる GEO 衛星数は 1 である。本研究では、ネットワークユーザが使用する端末は携帯可能な小型のモバイル端末を想定している。従って、アンテナサイ

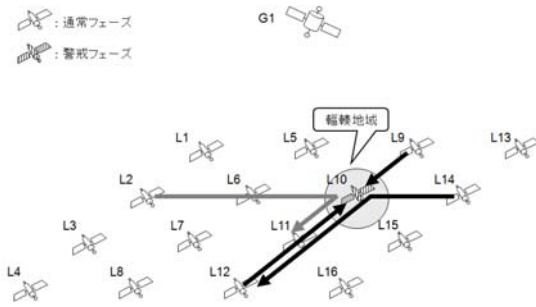


図 2: 輻輳地域と警戒フェーズ

ズやバッテリー容量などの制約を考慮し、ユーザ端末が接続する衛星は距離が短く電力消費が少ない LEO 衛星のみとし、ユーザは 1 つの LEO 衛星と GSL (Ground-Satellite Link) で相互接続されるものとする。

図 1 のようなマルチレイヤ衛星ネットワークをネットワークシミュレータ上で再現し、様々なシミュレーションを行うことによってトラヒックの集中現象や、ネットワーク性能及び通信性能に与える影響について評価する。さらに、その結果を基に、問題を解決するためのアルゴリズムやプロトコルを設計する。提案技術をネットワークシミュレータに実装し、性能評価を行う。以上の一連のサイクルを繰り返すことにより、提案技術を洗練し、マルチレイヤ衛星ネットワーク上で有効に動作するトラヒック分散技術の確立を目指す。

4. 研究成果

(1) 提案技術

①概要

本手法では、輻輳地域を LEO 衛星自身が特定するほか、同一軌道を周回する後続の衛星にその情報を伝えることにより、後続の衛星において輻輳の発生を予測することを可能にする。そして、実際に負荷分散を行う際には、隣接する LEO 衛星及び GEO 衛星を対象として、トラヒックの QoS を考慮した負荷分散（経路制御）を行う。トラヒックの QoS クラスは、トラヒックの遅延耐性に応じて A から C の 3 クラスに分類され、クラス A を遅延変動の影響を受けやすいクラス、クラス C を遅延変動にロバストなクラス、クラス B をその中間とする。

②輻輳の発生予測

各 LEO 衛星は通常フェーズまたは警戒フェーズのいずれかの状態をとる。LEO 衛星が輻輳地域外に存在する場合、その衛星は通常フェーズにある。通常フェーズである LEO 衛星

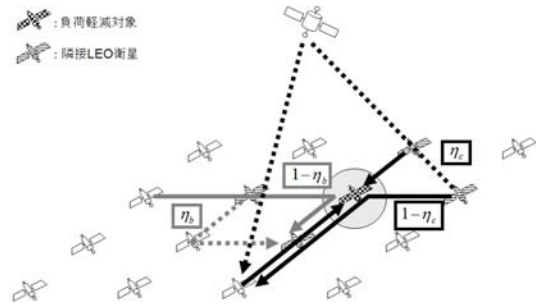


図 3: 迂回率に従ったトラヒック分散

においてトラヒック上昇が観測されると、その衛星がカバーしている地域は輻輳地域として見なされ、その衛星は警戒フェーズへと移行する。また、同一軌道を先行して周回している衛星から輻輳地域の位置情報を通知され、その地域内へ移動する場合も自動的に警戒フェーズへと移行する。従って、LEO 衛星は輻輳地域内に存在する場合、必ず警戒フェーズにある。警戒フェーズでは、輻輳地域情報の周囲への発信、並びにトラヒックの迂回による負荷分散を行う。以上のようなメカニズムにより、輻輳地域において輻輳発生を事前に予測し、実際に輻輳が発生する確率を抑制する。なお、図 2 は輻輳地域と警戒フェーズの関係を図示したものである。

③トラヒックの迂回による負荷分散

トラヒックの迂回では、高負荷状態の衛星へ転送されるパケットの一部をトラヒックタイプに応じて異なる迂回経路へ転送することで、QoS を考慮した負荷分散を可能にする。なお、負荷分散を行う際に必要な情報のやり取りは隣接衛星間のみであり、速やかなトラヒックの迂回処理が可能な点は提案手法が持つ利点の 1 つである。

一般にトラヒックの迂回を行う場合、迂回経路へと転送されたパケットの End-to-End 遅延は増加する。特に、LEO 衛星の高度と GEO 衛星の高度は大きく異なるため、GEO 衛星への迂回によって発生する遅延の変動は無視することができない。そのため、遅延の増加や変動によって QoS が大きく低下するアプリケーションのトラヒックなどは、可能な限り GEO 衛星への迂回は避ける必要がある。

上記のような観点から、トラヒックの QoS を考慮するために、トラヒックのクラスを遅延耐性に応じてクラス A からクラス C の 3 クラスに分類する。クラス A は VoIP (Voice over IP) や双方向動画配信に代表されるように、遅延の増加や変動が QoS に多大な影響を与える双方向リアルタイムアプリケーションとする。クラス B は、片方向動画配信など、クラス A より遅延耐性があるが、QoS が遅延変動の影響を受けるアプリケーションとす

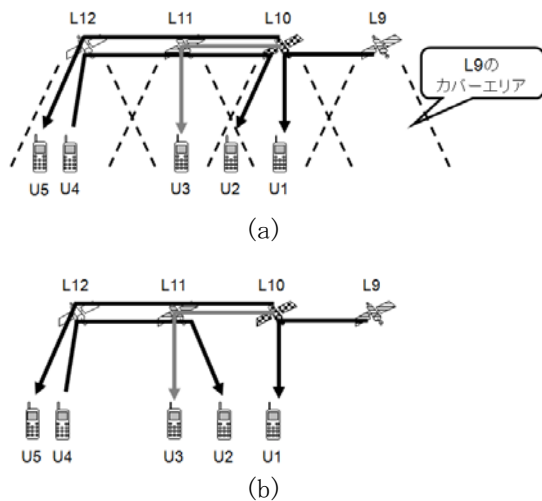


図4: 迂回ハンドオーバー

る。そしてクラスCは、遅延耐性が高いベストエフォートアプリケーションである。

各クラスのトラヒックの迂回は次のように行う。まず、クラスAは遅延の増加及び変動の影響を受けやすいため、迂回対象としない。クラスBは、遅延変動の影響を受けるため、LEO衛星ネットワーク内でのみ迂回させることとし、大幅な遅延変動の発生を避ける。そしてクラスCについては、QoSは遅延変動の影響をほとんど受けないことから、GEO衛星への迂回を行う。このような迂回規則を設けることにより、遅延耐性が低いクラスAやクラスBのQoSの低下の抑制を図る。さらに、迂回を開始する順番についても、まずはクラスCの迂回を行い、それでも負荷集中が改善されない場合にクラスBの迂回を行うという優先制御を行うことにより、クラスBのQoSの確保に努める。

④提案アルゴリズムの動作例

図3は、提案アルゴリズムによるトラヒック迂回の様子を示している。衛星L6を通過するトラヒックはクラスB、その他のトラヒックはクラスCであるとする。仮に今衛星L10のISLにおけるトラヒックレートが負荷分散開始の是非を判断する閾値を上回ったとする。このとき、衛星L10を通過するトラヒックを迂回させるため、衛星L10はトラヒッククラスごとの迂回率を算出し、迂回率と取得した輻輳地域情報を格納したシグナリング packets を隣接LEO衛星(L6, L9, L11, L14)に送信する。負荷分散に必要な情報を確実に伝えるため、衛星は通常のデータパケットよりもシグナリング packets を優先的に処理するものとする。隣接LEO衛星はシグナリング packets を受信後、LEO衛星のみを通過し、かつ高負荷状態の衛星を含まず、かつコストが最小となる迂回路を探索する。そして、ト

ラヒッククラスに応じて、トラヒックの一部をGEO衛星、または隣接LEO衛星へ迂回させる。図3の例では、衛星L6はクラスBの迂回率 η_b に相当する分のみ衛星L7へトラヒックを迂回させ、残りは衛星L10へ転送する。衛星L14はクラスCの迂回率 η_c に従い、一部を衛星L9へ、残りを衛星L10へ転送する。一方、衛星L9や衛星L11では、トラヒックの宛先が衛星L10がカバーするエリア内に存在しているため、トラヒックの迂回が行わない。トラヒックの集中が緩和され、衛星L10において輻輳が起こり得ないほど負荷が低減されると、衛星L10は隣接衛星にシグナリング packets を送信し、トラヒックの迂回を終了させる。

⑤迂回ハンドオーバー

迂回ハンドオーバーについて図4を用いて説明する。図4は図2と同様のネットワークトポロジにおいて、衛星L9から衛星L12を地表に垂直な平面で見た図である。ここで、衛星L10のGSLにおけるトラヒックレートが迂回ハンドオーバーを実施するか否かを判断する閾値を超過したとする。このとき、衛星L10は隣接衛星にシグナリング packets を送信し、隣接衛星のGSLにおけるトラヒックレートを自身に通知するように要求する。隣接衛星から情報を受け取った後、衛星L10は自身に接続している地上端末(図4(a)における端末U1と端末U2)に対し、収集した隣接衛星のGSLの負荷情報を伝達する。情報を受信した地上端末は、接続可能な衛星の中からGSLの負荷が最も小さい衛星を選択する。そして、地上端末が現在接続している衛星と異なるものを選択した場合は、現在接続している衛星との接続を切断し、新たな衛星に接続する。なお、図4(b)では、端末U1は衛星L10とのみ接続可能であるため迂回ハンドオーバーは行わない。一方、端末U2は衛星L10及び衛星L11と接続可能であるため、衛星L11の方がGSL上の負荷が小さい場合は、端末U2は衛星L10との接続を切断し、新たに衛星L11と接続する。

迂回ハンドオーバーでは、地上端末は高負荷状態の衛星から他の衛星へ接続先を変更し、GSL上の負荷を軽減する。しかし、接続先を変更可能な地上端末が多数あり、高負荷状態の衛星から一斉に負荷が低い他の衛星へのハンドオーバーが発生すると、高負荷状態の衛星のGSLの帯域利用率が一瞬にして減少する一方、新たに接続先として選択された衛星の負荷が急増するといった現象が起こりえる。つまり、無駄な迂回ハンドオーバーが頻発しかねない。これを防止するため、地上端末が接続先を変更する際、自身の送受信レートを新規接続先に通知して新規接続先がハンドオーバーを許可したとしても、GSL上のトラヒック

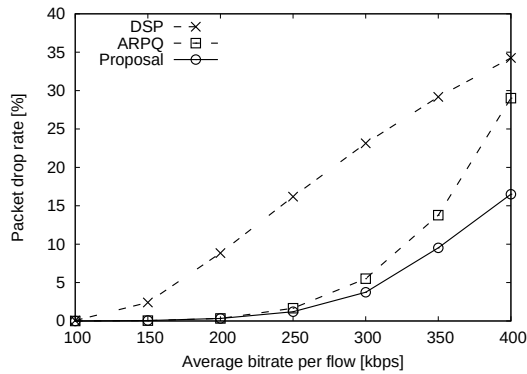


図 5: パケットドロップ率

クレートが一定の閾値を超える場合はハンドオーバーを行わないものとする。

(2) 性能評価

① シミュレーションの概要

提案技術の性能評価はネットワークシミュレータ (NS2: Network Simulator version 2.31) を用いて行った。図 1 に示すような GEO-LEO の 2 階層マルチレイヤ衛星ネットワークを想定した。なお、LEO 衛星ネットワークとしては Iridium のコンステレーションを採用し、GEO 衛星ネットワークは赤道上に等間隔で配置された 3 基の衛星で構成されるものとした。各ユーザが生成する UDP (User Datagram Protocol) の ON/OFF トラヒックの ON/OFF 時間はパレート分布に従い、その平均値はともに 200ms とした。ユーザ数は 100 とし、人口分布に従って配置し、クラス A を 3%、クラス B を 20%、クラス C を 77% とした。

提案手法は DSP (Dijkstra Shortest Path) ルーティングをベースとして実装した。DSP では、定期的に Dijkstra 法による最小コスト経路を求め、それに従って各衛星のルーティングテーブルを更新する。提案手法では、通常の経路選択に関しては DSP に準拠し、負荷分散実行時には提案アルゴリズムによる経路制御を行う。比較手法としては、提案手法のベースである DSP と、遅延変動に敏感なトラヒックの QoS を保証する ARPQ (Adaptive Routing Protocol for QoS) を用いた。ARPQ では各経路の End-to-End 遅延を計算し、その値が閾値を超えた場合は、遅延変動に敏感なトラヒックを上位層の衛星へと迂回させる。また、各 ISL のキュー長を定期的に計測し、その値が閾値を超えた場合は、遅延変動にロバストなトラヒックをキュー長が最も短い同じ層の衛星へと一定の割合で迂回させる。性能評価指標としては、パケットドロップ率、トラヒックの合計スループット、End-to-End 遅延を用いた。

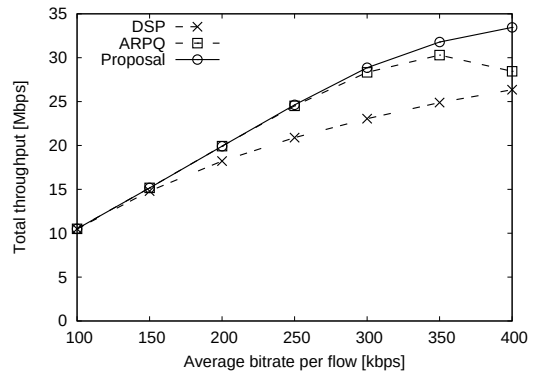


図 6: トラヒックの合計スループット

② パケットドロップ率の評価結果

パケットドロップ率を図 5 に示す。横軸は各送信ノードの送信時間中での平均送信レートを表す。DSP のパケットドロップ率が最も高いのは、キューイング遅延にのみ基づいて負荷分散を行うためである。また、経路の再計算を行う前に全ての衛星のキューイング遅延を取得する必要があるため、それ故に急激なトラヒック変動には対応できないことも原因の 1 つである。ARPQ では、LEO 衛星は定期的に各 ISL のキュー長を確認し、必要に応じて負荷分散を行う。しかしこの時、各リンクの使用率などを考慮せずに一定の割合でキュー長が短い ISL へ迂回されるため、迂回先の ISL が処理できるトラヒック量以上のパケットが転送された場合にパケットドロップが引き起こされてしまう。一方、提案手法では輻輳地域を特定し、その地域内で輻輳が発生しやすいと判断された LEO 衛星の負荷を分散させる。トラヒックの迂回は、ARPQ のように一定の割合ではなく、輻輳発生を抑制できるように算出された迂回率に従って行われるため、迂回による新たな輻輳はほとんど発生しない。

③ ネットワークの利用効率の評価結果

ネットワークを流れるトラヒックの合計スループットを図 6 に示す。提案手法が最も高い値を実現していることが確認できる。これは、パケットドロップ率を抑制したことによる効果大きい。また、マルチレイヤ衛星ネットワークの特徴でもある豊富なネットワークリソースを効率的に利用できていることの裏付けでもある。

④ 通信遅延の評価結果

次に、End-to-End 遅延を図 7 に示す。提案手法の各クラスの遅延に注目すると、クラス A とクラス B の遅延は小さく、クラス C でさえも DSP よりも低い値を実現していることが分かる。クラス A は迂回させない一方、クラス B 及びクラス C をそれぞれ隣接する LEO 衛

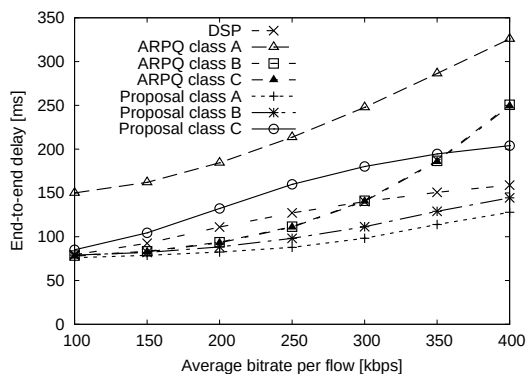


図 7: End-to-End 遅延

星及び GEO 衛星へ迂回させることにより、このような性能を実現することができる。

以上の通り、提案技術はパケットドロップ率を抑制してネットワークリソースの効率的な利用を実現すると同時にユーザの通信遅延を QoS 要求に応じて制御可能であり、これをもって本研究の目的を達成できたと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. 加藤寧, 風間宏志, 西山大樹, “衛星通信システム実験の現状と展望”, 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, vol. J94-B, no. 3, 2011 年, pp. 315-324.
2. 工藤大吾, 檀渕健一, 西山大樹, 加藤寧, “Load Balancing Method Based on Congestion Prediction for IP/LEO Satellite Networks”, IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol. E92-B, no. 11, 2009 年, pp. 3326-3334.
3. Tarik Taleb, Zubair Md. Fadlullah, 高橋哲也, Ruhai Wang, 根元義章, 加藤寧, “Tailoring ELB for Multi-layered Satellite Networks”, Proceeding of IEEE International Conference on Communications 2009, 査読有, 2009 年, pp. 1-5.

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 西山大樹, 吉村直子, 高橋卓, 加藤寧, “WINDS 搭載 ATM 交換機を利用した TCP 通信の基礎実験”, 電子情報通信学会総合大会 2011 (東日本大震災により大会中止で予稿集のみ発行), 2011 年 2 月 28 日.
2. 多田祐太, 西山大樹, 吉村直子, 加藤寧, “Characterization of Packet Losses and Delays in Multi-Layered Satellite

Networks Over an Efficient Routing Scheme”, Joint Conference on Satellite Communications 2010, 2010 年 10 月 29 日, 慶州 (韓国).

3. 多田祐太, 西山大樹, 吉村直子, 加藤寧, “An Effective Route Control Method on Multi-layered Satellite Networks”, International Astronautical Congress 2010, 2010 年 9 月 27 日, プラハ (チェコ).
4. 工藤大吾, 西山大樹, 加藤寧, “階層型衛星ネットワークにおける負荷分散方式の性能評価”, 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 2009, 2009 年 9 月 18 日, 新潟大学 (新潟県).
5. 工藤大吾, 檀渕健一, 西山大樹, 加藤寧, “CPLB: Congestion Prediction Based Load Balancing Method for Multi-Hop LEO/IP Satellite Networks”, 2009 Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers, 2009 年 8 月 20 日, 東北文化学園大学 (宮城県).
6. 工藤大吾, 檀渕健一, 加藤寧, “Congestion Prediction Based Load Balancing in IP/LEO Satellite Networks”, Joint Conference on Satellite Communications 2008, 2008 年 11 月 6 日, 釜山 (韓国).
7. Sumet Prabhavat, 西山大樹, Nirwan Ansari, 根元義章, 加藤寧, “Load Distribution with Queuing Delay Bound over Multipath Networks: Rate Control using Stochastic Delay Prediction”, 26th International Communications Satellite Systems Conference, 2008 年 6 月 11 日, サンディエゴ (米国).
8. 工藤大吾, 檀渕健一, 加藤寧, “LEO 衛星 IP ネットワークにおける輻輳予測を用いたトラヒック制御”, 電子情報通信学会衛星通信研究会, 2008 年 5 月 27 日, 日本大学 (千葉県).

〔その他〕

(1) ホームページ

<http://www.it.ecei.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 寧 (KATO NEI)

東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 00236168

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし