

列車を用いたデータ収集ネットワークの開発

土屋 隆司* 野末 道子**

Store-carry-forward Data Collecting Network Using Intermittent Link with Trains

Ryuji TSUCHIYA Michiko NOZUE

This paper describes the state of the art of the delay and disruption tolerant network technology (DTN), which is a promising solution for providing interoperable communications with and among extreme and performance-challenged environments where continuous end-to-end connectivity cannot be assumed. Based on the idea of DTN, we propose a store-carry-forward data collecting network using intermittent link with running trains as a tool to collect data from a variety of sensors which are attached to railway infrastructures for monitoring purposes. Communication tests have revealed that the system is effective, energy-efficient and robust enough to be used in sensor data gathering systems in railway environment.

キーワード：間欠接続, DTN (Delay-Tolerant Network), 蓄積運搬型データ伝送, 移動体通信, センサネットワーク

1. はじめに

インターネットに代表されるIPネットワークでは、通信を行うノード間にエンドツーエンドの通信パスが常時存在し、パケットロスや遅延も十分小さい安定的な通信が可能であるという前提に立っている。しかし、ネットワークの設置環境によっては、このような前提が成り立たない場合、あるいは常時接続環境を構築できたとしても十分な費用対効果が見込めない場合がある。近年、通信遅延が非常に大きい、通信リンクがしばしば途絶する（あるいは間欠的にしか通信できない）といったような劣通信環境下（通信環境の劣悪な環境の意）において安定的な通信を実現する技術としてDTN (Delay and disruption Tolerant Network) が注目されている。DTNの応用としては、固定ノード間の通信リンクが不安定、間欠的である場合に加えて、移動ノードを用いてデータを蓄積・運搬・転送するストア&フォワード型のアーキテクチャに関する検討も進められている。本稿では、このような蓄積運搬型データ伝送ネットワークを含むDTNの最近の動向を概観した上で、DTNの鉄道への適用可能性について議論する。また、DTNの応用のひとつとして沿線設置のセンサからのデータ収集手段としての活用事例について評価試験の結果を含めて報告する。

2. 蓄積運搬型データ伝送ネットワーク

2.1 基本的な考え方

DTNは、大きな伝送遅延、通信途絶が頻発するような劣通信環境下においてもエンドツーエンドの通信を

可能にする技術の総称である。ここでは、まず、従来の通信ネットワークとDTNの違いについて表1に整理する。この表に示されるように、DTNは、今日のインターネットに代表される汎用の通信ネットワークにおいて仮定されている前提条件の多くが成り立たないような劣悪な通信環境下においても動作する頑健なネットワークの実現を目指したものである。

蓄積運搬型データ伝送ネットワークは、移動体を用いた間欠接続型リンクを介してエンドツーエンドでのデータ転送を実現するものであり、DTNの実現形態のひとつと位置付けられる。DTNあるいは蓄積運搬型伝送の想定される応用分野としては、惑星間通信、軍事用アドホックネットワーク、十分な通信インフラが未整備な劣通信環境下のインターネットサービス（一般にChallenged Internetと呼ばれる）、センサネットワーク、広域データ散布などが知られている。これらのうち、本研究のターゲットであるセンサネットワークへDTNを適用する場合に

表1 従来のネットワークとDTNの比較

項目	従来ネットワーク	DTN
エンドツーエンドの通信パス	常に存在	存在しない、もしくは間欠的にしか存在しない
伝送遅延	ネットワーク負荷が増大した場合等を除き、一般的には極めて小さい。	時として非常に大きい（数分～数時間～数日）。リアルタイム要求のある応用には不向き
パケットロス	比較的小さい	比較的大きい
即時応答	可能	（多くの場合）不可能
帯域幅等が大きく異なる不均一なネットワークでの動作	不均一なネットワークでは安定的な動作は難しい。	不均一なネットワークでも頑健に動作する。

* 輸送情報技術研究部

** 輸送情報技術研究部（設備システム）

特集：輸送情報技術

は、限られた計算資源、電力資源の下での計測データの収集、不安定な接続リンクを介したデータ取得、移動体ノードによる効率的なデータ収集等が主要な検討課題となる。

2.2 標準化動向

DTNは、特定のプロトコルに依存しない、一般的な概念であるが、IP環境を前提とした検討が比較的進んでいるのでその概要を以下に紹介する。

インターネット関連の各種技術の標準化に取り組んでいるIETF (Internet Engineering Task Force) にはDTN RG (Research Group) が2002年に設置され、DTNアーキテクチャの検討、標準化に関する検討が精力的に進められている。検討結果はRFC4838 “Delay Tolerant Network Architecture” として公開されている。アーキテクチャの概要を以下に示す。

- ・転送すべきデータをバンドル (bundle) と呼ばれる可変長データにして蓄積伝送する。
- ・バンドルの保管、配送の責任を各ノード (custodian: 保管者と呼ぶ) に委ねる。保管者は信頼性のある配送の保証をする。
- ・バンドルは目的ノードに向けて保管者間でバケツリレー式に転送される。
- ・送信側はバンドル送信が成功するまで当該データをローカルストレージで保持する義務を有する。
⇒転送が成功したら、リソースを解放してよい。

IETFで検討されているDTNによるストア&フォワード型通信のアーキテクチャの概略を図1に示す。この図に示す「バンドル層 (bundle層)」が上記のバンドルの保管、配送を担う。

DTNの標準化は、Kevin Fall (Intel Research Berkeley) らによる初期の活動^{1) 2)} がベースとなっており、これに基づく様々な実証システムの構築が進められている。

2.3 既往の適用事例

本節では、劣通信環境下でのインターネットサービスおよびセンサネットワーク等のデータ収集ネットワークへのDTNの適用事例について述べる。

(1) 劣通信環境下でのインターネットサービス

DTNの適用事例としては、発展途上国など、通信インフラが未整備のエリアにおいてバス等の移動体を用いた

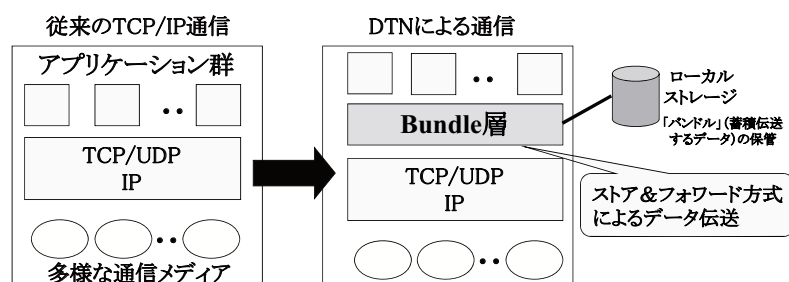


図1 DTNによるストア&フォワード型通信のためのアーキテクチャ

間欠接続によりインターネット接続を提供する事例がよく知られている。DakNet (MIT Media Lab)³⁾ は、その一例であり、公共バスをモバイルアクセスポイントとしてインターネットサービスを提供するものであり、インド、カンボジアで実際に実施展開されている。Rural Internet KIOSK⁴⁾ も同様のシステムであり、バスにモバイルDTNルータを搭載し、地方の情報拠点としてキオスク (rural KIOSK) に対して間欠接続のインターネットサービスを提供するものである。また、必ずしもすべてのアプリケーションが常時接続やリアルタイム応答を必要としないという点に着目し、間欠接続型のインターネットサービスを道路上で提供するDrive-thru Internet⁵⁾ もある。

(2) データ収集、センサネットワーク等

移動ノードを用いて散在したデータ発生源からデータを収集するしくみについての検討は数多く、近年では、センサネットワークへの応用を中心に検討が活発化している。無線センサネットワーク用のOSであるTinyOS上にDTNアーキテクチャを実装し、データ収集アプリケーションに適用した事例⁶⁾ では、データ伝送の目的地として中央のベースステーションを指定したツリー型のルーティング方式を採用している。一方、疎結合モバイルネットワーク (ネットワークが複数のパーティションに分割され、エンドツーエンドの通信がほとんど不可能な環境) 上で特別なモバイルノード (Message Ferry と称する) が他の一般ノードからデータを収集する方式が提案されている⁷⁾。Message Ferryは事前に決められた特定のルートを移動するので、一般ノードは自身の移動を、Message Ferryのそれに適応させることにより通信のチャンスを増やすことが可能となっている。

3. 蓄積運搬型データ伝送ネットワークの実装と鉄道への適用

3.1 バンドルプロトコルによる実装

蓄積運搬型データ伝送ネットワークの実装例はすでにいくつが存在する。代表的なものは2.2で述べたバンドルプロトコルであり、IETF DTN RGによる参照実装 (Reference Implementation) であるDTN2⁸⁾ がよく知られている。

バンドルプロトコルは、DTNのための汎用的なプラットフォームと位置付けられ、アプリケーションに依存せず利用可能であるという利点がある。また、各ノードが転送するデータ (バンドル) の保管、転送に責任を負うこと、また、エンドツーエンドの送達確認機能は持たないものの、隣接ノード間でのリンクバイリンクでのデータ送達保証は行う機能を有していることなどから一定レベルの信頼性を確保することができる。しかし、バンドルプロトコルの現在の実

装では下位層として、TCP/IPもしくはUDP/IPが仮定されており、センサネットワーク等で多く見られる非IP環境への適用もそのままでは難しい。

3.2 アプリケーションゲートウェイによる実装

蓄積運搬型データ伝送ネットワークを実装するもうひとつの方法は、対象とするアプリケーションに応じたゲートウェイ（アプリケーションゲートウェイと呼ぶ）を構築する方法である。アプリケーションゲートウェイは、異なるプロトコル間の相互接続のためのプロトコル変換装置として古くから使われてきたものであるが、データの蓄積・運搬機能を実現するための方式としても自然な実装と考えられる。アプリケーションゲートウェイ方式は、対象とするアプリケーションごとに個別に実装する必要があり、汎用性に欠けるという欠点もある。また、エンドツーエンドの送達確認機能は必要に応じてアプリケーションの機能として実現する必要がある。しかし、ネットワークのプロトコルスタック（プロトコルの階層構造のこと）を変更する必要がないこと、IP以外の通信手順の取り込みが容易であること、データの蓄積・運搬以外の拡張機能（データ圧縮、データフィルタリング、受信データに応じた各ノードでの自律制御等）の実現が容易であることなどの利点もある。

3.3 本研究における実装方針

蓄積運搬型データ伝送ネットワークを鉄道業務に適用する場合、導入目的や適用場面に依りて最適な実装方法を検討する必要がある。多用途に使える汎用的なシステムをめざす場合には、TCP/IPのプロトコルスタックにバンドルプロトコルなどを組み合わせた情報ネットワーク基盤を構築するのが望ましい。しかし、個々の応用に即した費用対効果の高いシステムを実現するためには、アプリケーションゲートウェイ方式による実装が、より効率的である。また、上述したように、末端の機器が必ずしもIPをサポートしていないという現状も考慮に入れる必要がある。

以上の点を考慮し、本研究では、ケーススタディとして、鉄道沿線に設置されるセンサ群からの計測データを収集するシステムを、車上のアプリケーションゲートウェイを用いた蓄積運搬型伝送ネットワーク上に実装し、その有効性を評価することとした。

4. センシングデータ収集への蓄積運搬型ネットワークの適用

4.1 システム要件

鉄道沿線の各種設備に設置されたセンサが計測したデータを収集する手段としては、保守担当者が現地に出向いて携帯端末等を用いてデータを読み取る方法、沿線に設置された自営の

データ通信インフラ（有線・無線）を用いてセンターに送信する方法、携帯電話、WiMAX等の公衆通信網を利用して伝送する方法、走行する列車、保守車等を用いて無線通信により、データを回収する方法等が検討されている⁹⁾。最適な収集手段の選択は、データ伝送の頻度、必要な帯域幅（データ伝送容量）、リアルタイム要求の有無、センター側からのセンサへの問い合わせ・制御の必要性、システム維持にかけられる費用等の要件に応じて決まる。

ここでは表2に示すような想定の下、沿線に設置されたセンサが計測したデータを、走行列車を用いて収集する蓄積運搬型データ伝送ネットワークについて検討した。

表2 沿線センサデータ収集のための蓄積運搬型データ伝送ネットワークの想定要件

項目	想定される条件
対象業務	レール温度測定（付随情報として気温、照度等も取得）
監視目的	常時の状態監視、特に気温上昇時のレール温度監視
データ伝送頻度	1回/10分
データ伝送容量	約100バイト/1回/1サイト
リアルタイム要求	比較的低い（1時間以内に監視サイトにデータが到着すればよい）
センター側からのセンサ制御	無し
センター側からセンサへのデータ要求	無し
省電力要求（地上機器）	高い（自己給電型が望ましい）

4.2 列車によるセンサデータの収集イメージ

ここでは前節で述べたシステム要件に基づいて設計した蓄積運搬型センサデータ収集システムについて述べる。システムの構成とデータ転送のイメージを図2に示す。この図に示されるように、各センサから中央のデータ管理サーバまでのデータの転送は3段階の間欠接続リンクを用いて行なう。最初に、各センサのデータを地上のゲートウェイに集約する①。データ集約するための

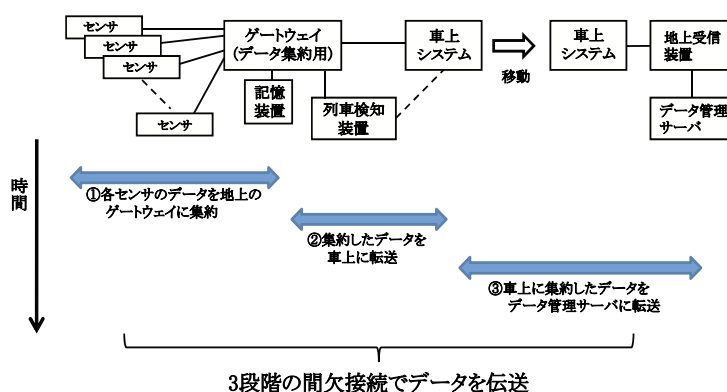


図2 列車を介した間欠接続リンクによるデータ転送

特集：輸送情報技術

伝送手段は、一般的なセンサネットワークプロトコルである ZigBee などの近距離無線通信もしくは有線による直結のいずれかを用いるものとする。各センサおよびゲートウェイは通常は休止状態として、時刻同期を取ることにより、計測もしくは通信を行なうタイミングのみ活性化されるものとする。それらは、機器が稼働中の限られた時間範囲内でのみ通信が可能であるという意味で間欠的な通信リンクと言うことができる。このようにして集約したセンサデータを保管しているゲートウェイは、一定周期の活性化タイミングに加えて、列車検知装置からのトリガーによっても、休止状態から活性化し、データを車上システムに転送する(②)。データを受信した車上システムは、駅などの伝送拠点に到着するまでデータを保持し、伝送路が開通したことを検知してデータ管理サーバ側へのデータ伝送を自動的に開始する(③)。

以上のような3段階の間欠接続リンクを用いたデータ転送は、一切人間の手を介することなく行うことができるため、システムの利用者からは「伝送遅延が比較的大きい単一の通信リンク」に見える。

4.3 センサ、ゲートウェイの省電力制御

センサ、ゲートウェイの省電力制御のための状態遷移を図3に示す。

センサは一定の周期で休止状態から活性化状態(計測や通信が可能な状態、電力消費大)に遷移し、計測およびゲートウェイへのデータ送信等の必要な動作を行い、再び休止状態に戻る。図は時間 t_0 ごとに活性化する例を示している。ゲートウェイもセンサと同様に一定周期で休止状態から活性化し、センサからのデータを受信する。当然のことながらすべてのセンサおよびゲートウェイの時刻は同期していなければならないため、データの送受信に合わせて時刻情報の伝送も合わせて行う。

ゲートウェイについては、センサデータ受信のための一定周期での活性化に加えて、列車通過をトリガーに活性化し、データを車上システムに送信する必要もある。活性化のトリガーが異なるため、図ではこれを別の状態「活性化状態-2」として、通常の一周期での活性化状態(「活性化状態-1」と)と区別して示している。

列車検知装置は、通常は「列車通過待ち状態」にあり、列車の通過を検出するとゲートウェイに対して列車検出を示す信号を発行する。処理が終了すると再び「列車通過待ち状態」となる。

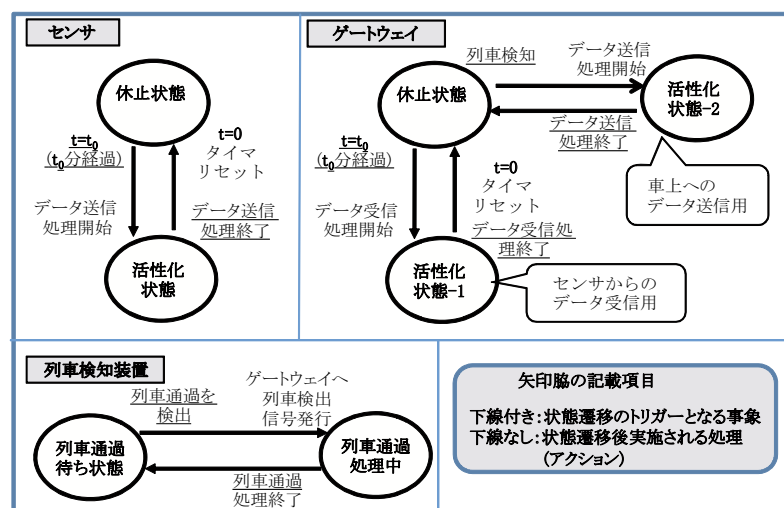


図3 センサ/ゲートウェイの省電力制御のための状態遷移

4.4 伝送データ保証の考え方

本システムにおける伝送データの保証の考え方を次に述べる。本システムでは、通信ノード間のリンクバイリンクでの送達確認と各ノードによるデータ保管、転送の保証により確実なデータ伝送を実現している(図4)。データを中継するシステム(地上ゲートウェイ、車上システム)は、送信ノードに対して、受信データの保管、転送を保証することになる。よって、受信ノードから送達確認を受けた送信ノードは、その時点でデータ保管のためのリソースを開放することができる。

より信頼性の高い伝送を実現するには、エンドツーエンドでの送達確認と再送制御が必要となるが、計算資源、電力資源の制約の大きい末端の機器には負担が重過ぎるため、本システムでは実装していない。センサデータの収集を目的とするならば、状況に応じたセンシング・伝送周期の動的・自律的変更、受信側(データ管理サーバ側)でのデータ到着監視およびデータ取得要求等を組み合わせることにより、トータルシステムの信頼性を確保する方が費用対効果の点からも合理的であろう。

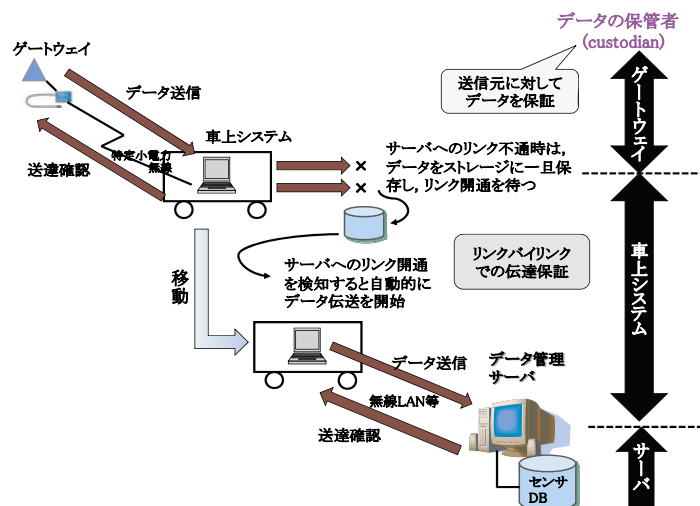


図4 伝送データの保証のしくみ

4.5 鉄道総研構内での評価試験

(1) 試験実施概要

4.2～4.4で述べたような蓄積運搬型データ伝送システムの機能確認のため、鉄道総研構内試験線において評価試験を実施した。試験で使用したセンサ側システム（ゲートウェイとセンサ）の概要を表3に示す。

表3 評価試験で使用したセンサ側システム

コンポーネント		主な仕様
マイクロコントローラ		ルネサステクノロジ製 R5F21276SNFP
センサ	熱電対（レール温度測定用）	Kタイプ（クロメル/アルメル） シース熱電対（非設置型）
	温度計（気温測定用）	ナショナルセミコンダクタ製 LM60
	照度センサ	ローム製 BH1603/FVC
無線通信モジュール		サーキットデザイン製MU-2-429 ARIB 標準規格 STD-T67 通信速度 4800bps
列車検知装置		コプト製 車軸検知器 15-B01-2539-000
電源	鉛蓄電池 12V5AH	ジーエス・パワーサプライ製 RE5-12
	太陽光パネル 12V6W	京セラ製 KD06

センサとしては、レール温度測定用の熱電対に加えて温度計および照度センサを搭載している。無線通信モジュールとしては特定小電力無線機を、列車検知装置としては車軸検知器を使用している。また、太陽光パネルから鉛蓄電池を充電することにより、センサ、無線通信モジュールおよび列車検知装置に電源供給している。センサと無線通信モジュールは、それぞれ計測時および無線通信時のみ電源が供給されるのに対して、車軸検知器は常時給電されている。

車上側システムとしては Windows 搭載のノート PC に上記と同じ無線通信モジュールを搭載したものを使用した。この車上システムは、無線 LAN (IEEE802.11b/g) ルータを介して 拠点に設置された地上側 IP ネットワークと間欠的に接続され、収集したセンサデータをデータ管理サーバ向けに一括転送する。

データ伝送試験用の機器構成の概要を図5に示す。

(2) 試験結果

試験線を繰り返し往復走行する列車（センサ設置箇所の通過速度：約30km/h）を用いてセンサデータを収集し、地上のデータ管理

サーバへのデータ伝送の成否を確認した。その結果、14回の試行のうち10回で①センサデータの集約、②車上収集、③データサーバへのアップロードの一連の動作が正しく実行された。なお、残りの4回の試行では、車上での受信が確認できなかったが、その後の調査で地上に設置したゲートウェイの無線機の設定の問題に起因することが判明した。

4.6 高速移動体との通信試験

(1) 試験実施概要

前節で述べた構内試験線での試験では移動体速度が30km/h程度と低速であった。そこで、在来線列車への適用を念頭に、より高速な移動体（走行速度120km/h～）でのデータ収集の可能性と課題について調べるため、(財)日本自動車研究所城里テストセンターにて、構内試験で使用した無線機を用いた移動体通信試験を実施した。図6に試験の概要を示す。本試験では測定の都合上、車上側から地上側に向けてテストパケットを送信し、地上局で受信処理をしているが、逆方向での試験と本質的な差異はない。

(2) 試験結果

表4に上記の移動体通信試験におけるパケット誤り特性を示す。なお、使用した無線機は、サーキットデザイ

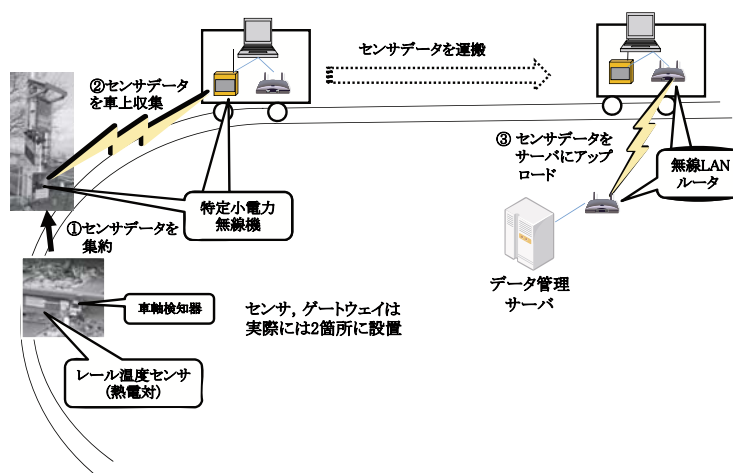


図5 データ伝送試験用機器構成概要

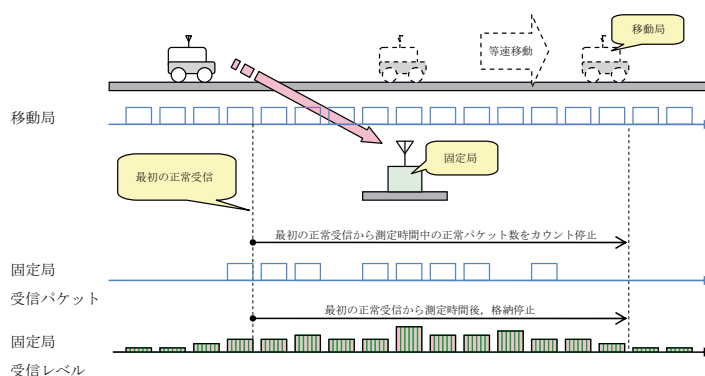


図6 移動体通信試験の概要

特集：輸送情報技術

ン製 MU-1N-429（使用周波数：429MHz、変調方式はFSK）である。予想された通り、パケット長が長くなるとパケット誤り率が増加する傾向があるものの、64バイト程度までのパケットでは安定的な送受信が可能であることが確認された。

一方、パケット誤りがどのような条件で発生しているかを把握することも重要である。そこでパケットロスが発生した位置と、受信波形データから計算した無線機受信レベルの間の関係を図7に示す。その結果、受信レベルの低い領域においてパケットロスが発生しているものの、受信レベルが高い領域（＝移動体が地上局脇を通過する前後2～3秒）では安定的に通信ができていることがわかる。

表4 移動体通信試験におけるパケット誤り特性

評価 パケット長 [バイト]	総送信 パケット数	総受信 パケット数	総 パケット損数	パケット 誤り率 (PER)	スルー プット [バイト/秒]
8	261	248	13	5.0%	82.6
16	220	207	13	5.9%	138.0
31	222	193	29	13.1%	249.3
64	155	133	22	14.2%	354.7

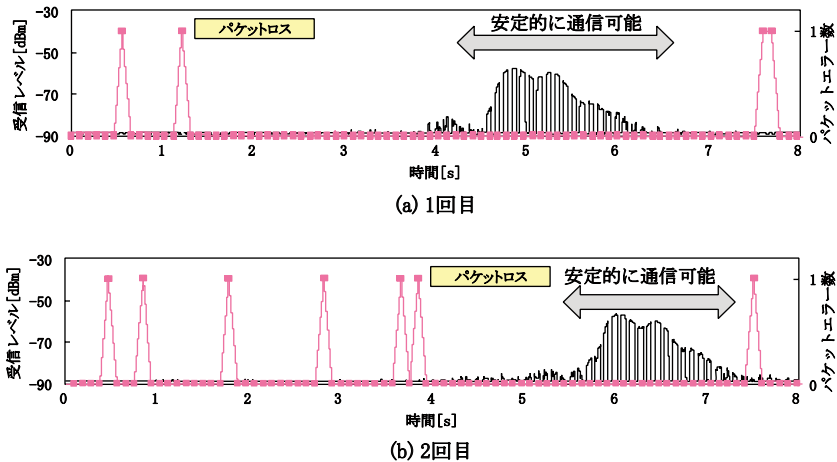


図7 無線機受信レベルとパケットエラーの発生状況

5. まとめ

劣通信環境下において安定的な通信を実現する技術であるDTN (Delay and Disruption Tolerant Network) が注目されている。本稿では、DTNおよびその一実現形態である蓄積運搬型データ伝送ネットワークの最近の動向を整理した。また、蓄積運搬型データ伝送ネットワークを沿線設置のセンサからのデータ収集手段としての活用する手法を提案し、試作システムによる評価試験により、実用可能性を示した。蓄積運搬型のデータ伝送システムは、データ収集の手段としてだけでなく、センター側からの端末・センサ等の制御や設定変更のためのデータ散布を効率的、低コストに行う手段としても期待される。引き続き、この分野の最新の技術動向を調査するとともに、さまざまな応用展開の可能性について検討していきたい。

文献

1) Kevin Fall, “A Message-Switched Architecture for Challenged Internets”, IRB-TR-02-010, 2002.
 2) Kevin Fall, “A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets”, IRB-TR-03-003, 2003.

3) Alex, Pentland, Richard Fletcher, “DakNet: Rethinking Connectivity in Developing Nations”, IEEE Computer pp.4-9, 2004.
 4) A. Seth, D. Kroeker, M. Zaharia, S. Guo, S. Keshav, “Low-cost Communication for Rural Internet Kiosks Using Mechanical Backhaul”, Proc. MOBICOM 2006, 2006.
 5) Jorg Ott et al., “Why seamless? Towards exploiting WLAN-based intermittent connectivity on the road”, Proceedings of the TERENA Networking Conference, 2004.
 6) Rabin Patra, et.al. “DTNLite: A Reliable Data Transfer Architecture for Sensor Networks”, http://www.cs.berkeley.edu/~rkpatra/cs294_deep/deep_proj/deep_rabin_sergiu/dtnlite_rabin_sergiu.pdf.
 7) Wenrui Zhao et al., “A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks”, Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, pp187-198, 2004.
 8) http://sourceforge.net/project/showfiles.php?group_id=101657
 9) 野末道子, 土屋隆司, 渡辺義大, 佐藤紀生: 鉄道構造物の常時・異常時モニタリングシステムの開発, 鉄道総研報告 Vol.24, No. 10, 2010