

流星バースト通信網を用いた遠隔モニタリングシステムの性能評価(無線分散ネットワーク, M2M (Machine-to-Machine), D2D (Device-to-Device), 一般)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2014-10-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 竹内, 康裕, 椋本, 介士, 和田, 忠浩 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/7945

流星バースト通信網を用いた遠隔モニタリングシステムの性能評価

竹内康裕[†] 椋本 介士^{††} 和田忠浩[†]

[†] 静岡大学大学院工学研究科

〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3 丁目 5-1

Email:f0330121@ipc.shizuoka.ac.jp

^{††} 静岡大学技術部

〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3 丁目 5-1

あらまし 流星バースト通信 (Meteor Burst Communication: MBC) は、小容量でかつ多少の遅れを問題としないデータ伝送に対して多くの利点を持つ見通し外通信である。本稿では、この MBC を利用して、地理的に離れた多数の監視対象局から 1 つの監視局へ固定長のモニタリングデータを一定周期で収集するシステムを想定し、そのデータ伝送プロトコルとしてランダム送信方式とランダム遅延時間方式を提案する。また、理論解析および計算機シミュレーションにより、それらの性能評価を行うとともに、送信確率の最適制御法を示す。

キーワード 流星バースト通信, データ収集システム, グローバルポーリング方式, ランダムアクセス

Performance Evaluation of a Remote Monitoring System Using Meteor Burst Communications

Yasuhiro TAKEUCHI[†], Kaiji MUKUMOTO^{††}, and Tadahiro WADA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Shizuoka University.

3-5-1 Johoku Naka-ku Hamamatsu-shi Shizuoka-ken, 432-8561 Japan

Email:f0330121@ipc.shizuoka.ac.jp

^{††} Division of Technical Service, Shizuoka University.

3-5-1 Johoku Naka-ku Hamamatsu-shi Shizuoka-ken, 432-8561 Japan

Abstract Meteor Burst Communication(MBC) is an attractive beyond line of sight communication mode, which is known to have many advantages for systems with delay tolerance and low data transmission rate. This paper considers a remote monitoring system collecting fixed-length monitored data in a fixed period from many remote stations deployed in large area to one master station by using MBC. We then propose two data transmission protocols for this system, named random transmission scheme and random delay time scheme, and evaluate the performances of the schemes by numerical analyses and computer simulations. Optimization of the transmission probability is also investigated.

Key words Meteor Burst Communications, Data collecting system, Global polling scheme, Random access

1. はじめに

地球全体で 1 日に約 1t, 個数にして約 1 兆個にもものぼる宇宙の塵が流星として降り注いでいる。それらの流星は、大気圏に突入する際に上空 80~100km に流星バーストと呼ばれる細長い電離気体を生成する。流星バースト通信 (Meteor Burst Communication: MBC) [1] [2] は、この流星バーストによる低 VHF 帯電波の反射現象を利用した見通し外通信であり、最大通信可能距離は 2000km 程度である。ある 2 点間に流星バース

ト伝送路が確立するのは、その 2 点を焦点とする回転楕円体の 1 つに接する流星バーストが発生した時であり、その確率は十数秒に 1 回程度であると言われている。発生した流星バーストは拡散により平均数分の 1 秒程度で消滅してしまうが、その間、マルチパスやドップラーシフトの少ない比較的良好な反射体として働くことが知られている。

MBC は、大容量あるいは即時性を要求される通信には適さないが、小量でかつ多少の遅れを問題としないデータの伝送には、システムの構築の容易さ、頑強さ、経済性などの利点を

持っている。そのため、MBC は主に通信インフラの未発達な地域において、広範囲に分布した観測点から気象データなどを収集するシステムに利用されてきた。また近年では、既存の通信インフラに依存しない MBC の頑強が見直され、大規模災害時のバックアップシステムとしても有望視されている。例えば、NHK では、全国に点在する放送中継局の動作状況を定期的に監視する遠隔モニタリングシステムとして、既存の通信インフラを用いたシステムに加えて、MBC データ収集網を併用する方法が検討されている。

本稿では、MBC 網による遠隔モニタリングシステムを想定したデータ伝送プロトコルを数種提案し、それらの性能評価を理論解析及び計算機シミュレーションにより行う。

本稿の構成は以下の通りである。2 章では流星バースト伝送路について概説し、本稿で仮定する伝送路である ON-OFF 伝送路について述べる。3 章では MBC 遠隔モニタリングシステムについて述べ、提案するデータ伝送プロトコルについて説明する。4 章ではデータ伝送プロトコルの理論解析を行い、5 章では理論解析および計算機シミュレーションからそれらの性能を評価する。そして、6 章で本研究を総括する。

2. 流星バースト伝送路

流星バーストは、その線電子密度により、アンダーデンスバーストとオーバードデンスバーストに大別される。アンダーデンスバーストとオーバードデンスバーストでは、反射機構が異なり、そのため荷電粒子の拡散が反射効率に与える影響も異なっている。反射効率は、アンダーデンスバーストでは、ほぼ流星バースト発生時に最大となり、その後拡散にともなって指数的に減衰するが、オーバードデンスバーストの場合は、蒲鉾型に変化すると言われている。さらに実際の流星バースト反射波の受信電力は、上空の風などの影響により様々な変化を示す。

一方、統計的性質としては、任意の 2 点間の流星バースト伝送路の発生間隔とその継続時間は指数分布に従うと言われている。この発生間隔および継続時間の平均をそれぞれ $1/l_0$ 、 $1/m_0$ で表す。 $1/l_0$ 、 $1/m_0$ の値は、使用周波数、送信電力、アンテナ利得などのシステムパラメータや通信距離など様々な要因に依存する。また流星バーストの発生頻度には、日変動や季節変動があるため、同一のシステムであっても $1/l_0$ の値はかなり大きく変動する可能性がある。

MBC システムの性能評価を行うには、このように複雑に状態が変化する伝送路を、その特徴を残しつつ、単純化したモデルが必要となる。そうした流星バースト伝送路モデルは、その使用目的に応じて様々なものが提案されているが、本稿では、MBC 網の基本的な性能を評価するため、それらの内、最も簡単な ON-OFF モデルと呼ばれるモデルを用いて、特性の理論解析および計算機シミュレーションを行う。

2.1 ON-OFF 伝送路モデル

ON-OFF 伝送路モデルでは、任意の 2 局間の伝送路の状態は、図 1 のように、開いている状態 (ON State) と閉じている状態 (OFF State) の 2 つだけであるとする。伝送路の状態が ON のとき送信されたパケットの伝送はパケット同士の衝突が

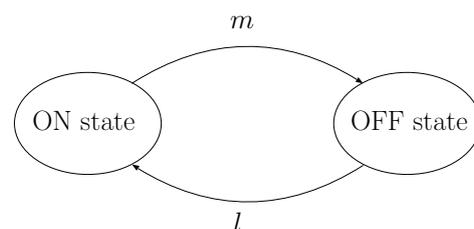


図 1 ON-OFF 伝送路モデルの状態遷移図

なければ必ず成功するとし、雑音等による失敗はないものとする。一方、OFF 状態において送信された信号は全く伝送されず、パケット送信時間中の一部でも伝送路の状態が OFF になったときには、その送信は必ず失敗するものとする。伝送路の状態は、マルコフ過程に従って遷移するとし、ON 状態から OFF 状態への遷移率 m 、及び OFF 状態から ON 状態への遷移率 l は一定とする。すなわち、OFF 状態にある伝送路は、平均 $1/l$ 秒の指数分布時間後に ON 状態となり、ON 状態にある伝送路は、平均 $1/m$ 秒の指数分布時間後に OFF 状態になるとする。ON 状態への移行には、パケット伝送に必要な受信電力をもたらす、比較的大きな流星バーストの発生が必要となる。そのため、 $1/l$ の値は、前述の $1/l_0$ よりもかなり大きな値となり、受信機周辺の雑音等にもよるが、その典型値は数十秒から数分程度となる。一方、流星バーストの継続時間は、その検出閾値が変化してもほとんど変化しないことが知られており、 $1/m$ は $1/m_0$ とほぼ同じ典型値、数百 ms を持つと考えられる。

3. MBC 遠隔モニタリングシステム

監視対象の遠隔局をリモート局、モニタリングデータを収集する中心局をマスタ局と呼ぶ。本稿では、地理的に離れた多数のリモート局で定期的に生成されるモニタリングデータを、MBC を用いて 1 つのマスタ局へ、一定時間内に収集するシステムを考える。全リモート局数を M とし、各リモート局は定められた時刻に一齐にモニタリングデータを生成するものとする。生成されたモニタリングデータは、固定長のデータパケットとしてマスタ局への伝送が試みられ、一定時間内 T の間に伝送に成功しなかったデータは破棄されるとする。以下では、この T を観測期間と呼ぶ。

このような MBC データ収集システムの伝送プロトコルとしては、繰り返し送信方式 [3]、ポーリング方式、電力変化方式 [5] など様々な方法が提案されている。ポーリング方式は、さらに個別ポーリング方式、グループポーリング方式、グローバルポーリング方式に分類することができる。文献 [4] では、これらのポーリング方式の特性解析、性能評価が行われ、グループポーリング方式が優れていることが示されている。しかし、グループポーリング方式はグループ内のリモート局数を最適に保つためにグループの再編が必要であり、そのためのオーバーヘッドが無視できない。文献 [4] のグローバルポーリング方式

では、ポーリングパケットを受信したりリモート局は必ずデータパケットを返送するとしているが、この返送を確率的にすることでグループポーリング方式と同様、グローバルポーリング方式においても応答リモート局数の制御が可能であり、これは比較的用意に実現できる。本稿では、こうしたランダムアクセス型のグローバルポーリング方式として次に示す方法を提案し、その性能評価を行う。

3.1 ランダム送信方式

ポーリング方式では、マスタ局は一定間隔でポーリングパケットを送信し、それを受信したりリモート局は、そのポーリングが自局宛であった場合にデータパケットを返送する。グローバルポーリング方式におけるポーリングパケットは常に全リモート局宛であり、その役割は流星バースト伝送路の有無確認にある。そのため、以下ではグローバルポーリングパケットをプローブパケット (Probe Packet: PP) と呼ぶ。PPを受信したりリモート局が、常にデータパケット (Data Packet: DP) を返送するとすると、リモート局が多い場合には、同時に複数のリモート局が DP を送信し、パケットの衝突による伝送の失敗が発生し易くなる。そこで本稿では PP を受信したりリモート局が、確率 p で DP を返送し、 $1-p$ で送信を見合わせることでパケット衝突の可能性を下げる方式 (ランダム送信方式) を提案する。DP の受信に成功したマスタ局は、そのリモート局宛に受信確認パケット (Acknowledge Packet: AP) を送信する。AP の受信に成功したりリモート局は休止状態となり、次の観測期間まで DP の送信を行わない。

3.2 ランダム遅延時間方式

ランダム遅延時間方式は、PP を受信したりリモート局が DP を送信するか否かを、それまでの待ち時間を考慮して決定する方式である。本稿では、DP 送信待ち時間を考慮する場合と PP 受信待ち時間を考慮する場合を考え、それぞれ以下のようにして DP を送信するか否かを決定するとする。

3.2.1 ランダム遅延時間方式 I

- 1) 各リモート局は、観測期間の開始時あるいは DP 送信直後に、平均 r_D の指数分布に従う乱数値 R_D を生成し、それを記憶する。
- 2) 各リモート局は、DP 送信待ち時間 w_D を保持している。 w_D は、そのリモート局が直前に DP を送信してからの経過時間であり、最初の DP 送信以前における w_D の値は、観測期間の開始時点からの経過時間とする。
- 3) PP を受信したりリモート局は、 $w_D < R_D$ ならば DP 送信を見合わせ、 $w_D \geq R_D$ ならば DP を送信する。
- 4) DP を送信したりリモート局は、新たに平均 r_D の指数分布に従う乱数値 R_D を生成し、 $w_D = 0$ として DP 送信待ち時間の計測を再開する。

3.2.2 ランダム遅延時間方式 II

- 1) 各リモート局は、PP 受信待ち時間 w_P を保持している。 w_P は、そのリモート局が直前に PP を受信してからの経過時間であり、最初の PP 受信以前における w_P の値は、観測期間の開始時点からの経過時間とする。
- 2) PP を受信したりリモート局は、平均 r_P の指数分布に従う

乱数値 R_P を生成し、 $w_P < R_P$ ならば DP 送信を見合わせ、 $w_P \geq R_P$ ならば DP を送信する。

- 3) 各リモート局は、PP 受信完了時および DP 送信完了時に $w_P = 0$ として PP 受信待ち時間の計測を行う。

4. グローバルポーリング方式の理論解析

本章では、3. で提案したランダムアクセス型のグローバルポーリング方式の性能を理論解析する。なお、各リモート局とマスタ局間の伝送路は互いに独立で同一であるとし、それぞれ 2. で示した ON-OFF 伝送路モデルに従うとする。

4.1 ランダム送信方式

ランダム送信方式の動作例を図 2 に示す。PP 長を d_P 、DP 長を d_D 、DP 応答待ち時間を d_W 、AP 長を d_A とする。伝送に成功していないリモート局数が n 局の場合を考え、 n 局の内、いずれか 1 つが DP の伝送に成功し、AP を受信するまでの平均時間を $\bar{T}_S(n)$ 、また、 n 局すべてのリモート局が AP の受信に成功するまでの平均時間を $\bar{T}_{all}(n)$ とする。このとき、明らかに次の漸化式が成り立つ。

$$\bar{T}_{all}(n) = \bar{T}_{all}(n-1) + \bar{T}_S(n) \quad (1)$$

従って、 M 局すべてが AP の受信に成功するまでの平均時間 $\bar{T}_{all}(M)$ は、

$$\bar{T}_{all}(M) = \sum_{n=1}^M \bar{T}_S(n) \quad (2)$$

で求めることができる。以下では、 $\bar{T}_S(n)$ の計算方法を示す。

残りのリモート局数が n 局のとき、任意の 1 つのリモート局が 1 つの PP に対して DP を返送する確率をそのリモート局のトラヒックとよび、 $g(n)$ で表す。このとき、PP の平均送信間隔 $\bar{T}_P(n)$ は、

$$\bar{T}_P(n) = d_P + d_W + d_D \cdot S_D(n) + d_A \cdot S_{DS}(n) \cdot \exp(-md_D) \quad (3)$$

で求められる。ここで $S_D(n)$ は、1 つの PP に対して少なくとも 1 つの DP が送信される確率であり、

$$S_D(n) = 1 - (1 - g(n))^n \quad (4)$$

である。また、 $S_{DS}(n)$ は、AP が送信される確率、すなわち DP の伝送が成功する確率であり、

$$S_{DS}(n) = ng(n)(1 - g(n))^{n-1} \cdot \exp(-md_D) \quad (5)$$

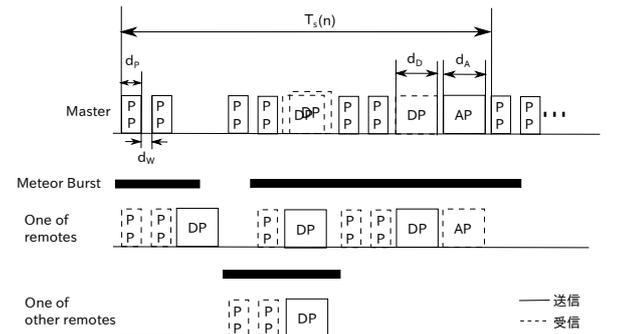


図 2 ランダム送信方式の動作例

である。

一方、 $\bar{T}_P(n)$ が与えられると、リモート局当りのトラヒック $g(n)$ は、次のようにして見積もることができる。注目する1つのリモート局とマスタ局間の伝送路状態が、OFF 状態から ON 状態に遷移し、再び OFF 状態になるまでの期間を伝送路サイクルとよぶ。ON-OFF 伝送路モデルを仮定すると、1つの伝送路サイクル内で送信される PP の平均数は $(1/l + 1/m)/\bar{T}_P(n)$ で与えられる。従って、1つの伝送路サイクル内で当該リモート局から送信される DP の数 N_D の平均 \bar{N}_D が求まれば、DP 送信確率 $g(n)$ は、

$$g(n) = \frac{\bar{T}_P(n) \cdot \bar{N}_D(n)}{1/l + 1/m} \quad (6)$$

で求められる。以下では、この $\bar{N}_D(n)$ を関係式

$$\bar{N}_D(n) = \sum_{i=0}^{\infty} \Pr(N_D > i) \quad (7)$$

を用いて求める。各リモート局は、マスタ局間の伝送路状態が ON の期間でのみ PP の受信に成功するので、1つの伝送路サイクル内でちょうど k 個の PP を受信する確率 $\Pr(k)$ は、ON 状態の継続時間を表す確率変数を X とすると、

$$\begin{aligned} \Pr(k) &= \Pr\{k\bar{T}_P(n) < X < (k+1)\bar{T}_P(n)\} \\ &= \exp(-mk\bar{T}_P(n))\{1 - \exp(-m\bar{T}_P(n))\} \end{aligned} \quad (8)$$

で見積もることができる。リモート局は、1つの PP 受信に対して確率 p で DP を送信するので、この伝送路サイクルで DP を1回以上送信する確率は、

$$P_{DT0}(k) = 1 - (1-p)^k \quad (9)$$

で与えられる。次に、DP を2回以上返送する確率を求める。DP 送信中は PP を受信できないので、DP を送信すると PP 受信数が減少する。1つの DP 送信により減少する PP 受信数 h を

$$h = \frac{d_D}{\bar{T}_P(n)} \quad (10)$$

とすると、1つの伝送路サイクル内でちょうど1回 DP を送信する確率は、

$$P_{DT1}(k) = \begin{cases} 1 - (1-p)^k & (k \leq h) \\ (k-h)p(1-p)^{k-h} & (k > h) \end{cases} \quad (11)$$

で与えられる。1つの伝送路サイクル内で2回以上 DP を送信する確率は、 $k > h$ の場合において1回以上送信する確率から、ちょうど1回送信する確率を減算し、それに1回目の送信が失敗である確率を乗算したものであるから、

$$P_{DT0}(k) = (P_{DT0}(k) - P_{DT1}(k)) \cdot \{1 - (1-g(n))^{n-1}\} \quad (12)$$

となる。従って、式(7)において、1つの伝送路サイクル内で3回以上 DP が送信される確率を無視し、式(6)を用いて $g(n)$ を計算すると、

$$\begin{aligned} g(n) &= \frac{\bar{T}_P(n)}{1/l + 1/m} \cdot \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} P_{DT0}(k) \cdot \Pr(k) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=h+1}^{\infty} P_{DT0}(k) \cdot \Pr(k) \right\} \\ &= \frac{\bar{T}_P(n)}{1/l + 1/m} \left[\frac{p \cdot \exp(-m\bar{T}_P(n))}{1 - (1-p) \cdot \exp(-m\bar{T}_P(n))} \right. \\ &\quad \left. + \frac{p^2 \cdot \exp(-m(h+2)\bar{T}_P(n))\{1 - (1-g(n))^{n-1}\}}{\{1 - (1-p) \cdot \exp(-m\bar{T}_P(n))\}^2} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

が得られる。最終的な $g(n)$ および $\bar{T}_P(n)$ の値は、式(3)と式(13)を連立方程式として数値計算することにより求められる。 $g(n)$ が求まると、1つの PP に対してマスタ局が DP の受信に成功し、リモート局で AP が受信される確率は、その PP に応答して DP を送信するリモート局が1つだけであり、そのリモート局とマスタ局間の流星バースト伝送路が $(d_D + d_A)$ 秒間以上継続する場合であるから、

$$S_A(n) = ng(n)(1-g(n))^{n-1} \cdot \exp(-m(d_D + d_A)) \quad (14)$$

で求められる。従って、残りのリモート局数が n のとき、任意のリモート局が DP 伝送に成功し AP を受信するまでに要する平均時間は

$$\bar{T}_S(n) = \frac{\bar{T}_P(n)}{S_A(n)} + d_D + d_A \quad (15)$$

で求められる。

4.1.1 DP 送信確率の最適値

いずれか1つのリモート局が AP の受信に成功するまでの平均時間 $\bar{T}_S(n)$ を最小にする DP 送信確率 p の最適値を p_{opt} とする。さらに、システム全体のトラヒックを G とし、次式のように定義する。

$$G = ng(n) \quad (16)$$

$(1-g(n))^{n-1} \approx \exp(-G)$ と近似し、 $G \gg md_D, md_A$ として式(14)を簡略化すると、式(15)の $\bar{T}_S(n)$ は G のみに依存する関数

$$\bar{T}_S(n) \approx \frac{d_P + d_W + d_D \cdot \{1 - \exp(-G)\}}{G \cdot \exp(-G)} + d_D + d_A \quad (17)$$

となる。これを G で微分して0と置くことにより、

$$\frac{d_D}{d_P + d_W + d_D} = (1-G) \cdot \exp(G) \quad (18)$$

が得られる。式(18)を満たす G が最適なトラヒック G_{opt} であり、 G_{opt} は AP の受信に成功していないリモート局数 n に依らず、ほぼ一定の値をとる。また、リモート局あたりの最適トラヒック $g_{opt}(n)$ は、 G_{opt} を式(16)に代入することにより与えられ、このときの平均 PP 送信間隔 \bar{T}_{Popt} は、式(3)より、

$$\bar{T}_{Popt} = d_P + d_D \cdot \{1 - \exp(-G_{opt})\} + d_A \cdot G_{opt} \cdot \exp(-G_{opt}) \quad (19)$$

で近似される。残りのリモート局数が n の時の DP 送信確率の最適値 $p_{opt}(n)$ は、式(13)へ $g_{opt}(n)$ および \bar{T}_{Popt} を代入し、 p について解くことにより求めることができる。また、簡易に

p_{opt} を求める方法として、ランダムに送信した PP が受信される確率から、

$$p_{opt}(n) \simeq g_{opt}(n) \cdot \left(1 + \frac{m}{l}\right) \cdot \exp(md_P) \quad (20)$$

として求めることもできる。なお、 $p_{opt}(n) > 1$ の場合は $p_{opt}(n) = 1$ とする。

4.2 ランダム遅延時間方式 I

この方式では、各リモート局は、平均 r_D 秒の指数分布時間後に、平均 $1/l$ 秒の流星バースト伝送路が発生し最初の PP が受信されたとき DP を送信する。従って、この間における残りのリモート局数 n の変化が僅かであるとすると、任意の 1 つのリモート局が PP に対して応答する確率、すなわち、1 リモート局あたりのトラヒック $g(n)$ は、

$$g(n) \simeq \frac{\bar{T}_P(n)}{r_D + 1/l} \quad (21)$$

で求められる。

ランダム遅延時間方式 I における、いずれか 1 つのリモート局が DP の伝送に成功し、AP を受信するまでの時間は、式 (13) を式 (21) に置き換えて、式 (3) との連立方程式を解き、得られる $g(n)$ および \bar{T}_P を式 (15) に代入することにより求めることができる。さらに、 M 局すべてのリモート局が伝送に成功するまでの平均時間 $\bar{T}_{all}(n)$ は、ランダム送信方式の場合と同様に式 (9) より求めることができる。

残りのリモート局数が n のとき、 $g(n)$ を $g_{opt}(n)$ とする r_D の最適値 $r_{D,opt}$ は、式 (21) より

$$r_{D,opt}(n) = \frac{\bar{T}_P(n)}{g_{opt}(n)} - \frac{1}{l} = \frac{n\bar{T}_{P,opt}}{G_{opt}} - \frac{1}{l} \quad (22)$$

で与えられる。ただし、 $r_{D,opt}(n) < d_P + d_W$ の場合は $r_{D,opt}(n) = d_P + d_W$ とする。

4.3 ランダム遅延時間方式 II

注目リモート局が最初に PP を受信するまでの待ち時間を $w_{p,1}$ 、2 番目までの待ち時間を $w_{p,2}$ 、 k 番目までの待ち時間を $w_{p,k}$ とし、

$$w_D = \sum_{i=1}^k w_{p,i} \quad (23)$$

とする。ランダム遅延時間方式 II では、 k 番目の PP 受信時に DP が送信される確率は、

$$\begin{aligned} & \prod_{i=1}^{k-1} \Pr(w_{p,i} < R_P) \cdot \Pr(w_{p,k} \geq R_P) \\ & = \exp\left(-\frac{1}{r_P} \sum_{i=1}^{k-1} w_{p,i}\right) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{w_{p,k}}{r_P}\right)\right\} \end{aligned} \quad (24)$$

で与えられる。一方、ランダム遅延時間方式 I において、 k 番目の PP 受信時に DP が送信される確率は、

$$\begin{aligned} & \Pr(w_D - w_{p,k} < R_D \leq w_D) \\ & = \exp\left(-\frac{w_D - w_{p,k}}{r_D}\right) - \exp\left(-\frac{w_D}{r_D}\right) \end{aligned} \quad (25)$$

で与えられる。従って、式 (24) および式 (25) において、 $r_D = r_P$ とすれば両確率は等しいので、ランダム遅延時間方式 II はランダム遅延時間方式 I と同じ特性となることがわかる。しかし、ランダム遅延時間方式 II では、PP 受信ごとに r_P を変化させることができるため、各時点の残りのリモート局数に対応して、 r_P を最適に制御できるという利点がある。

5. 性能評価

本章では、ランダム送信方式およびランダム遅延時間方式の性能評価を数値例を用いて行う。なお、全リモート局数 M を 2000 局とし、 $d_P = 0.01[\text{sec}]$ 、 $d_W = 0.02[\text{sec}]$ 、 $d_D = 0.03[\text{sec}]$ 、 $d_A = 0.03[\text{sec}]$ とする。また、流星バーストの平均継続時間 $1/m$ を $0.3[\text{sec}]$ とする。シミュレーションにおいては、マスタ局およびリモート局における送受切替時間 s 、電波伝搬時間 a も考慮し、それぞれ $s = 0.003[\text{sec}]$ 、 $a = 0.0063[\text{sec}]$ とする。

5.1 ランダム送信方式

DP 送信確率 p を 0.1 で一定とした場合、および常に最適値に制御した場合における流星バースト伝送路の平均発生間隔 $1/l$ に対する \bar{T}_{all} の変化を図 3 に示す。図中の一点鎖線は $p = 0.1$ に対する理論値を表し、実線は n の変化に対応して p を式 (20) で与えられる最適値 $p_{opt}(n)$ に制御した場合の理論値を表している。また、○、□印はそれぞれのシミュレーション結果である。

図より、シミュレーション値と理論値に若干のずれがあるがよく一致していることがわかる。ずれの原因としては、式 (7) の計算において、1 つの伝送路サイクル内で 3 回以上 DP が送信される確率を無視したこと、PP の送信間隔として平均値 $\bar{T}_P(n)$ のみを用いていることなどが考えられる。

$p=0.1$ で一定の場合、流星バースト伝送路の平均発生間隔が $10[\text{sec}]$ のときは、 $20[\text{sec}]$ のときに比べ、伝送路の発生頻度が高いにも関わらず、すべてのリモート局からデータを収集するのにより長い時間が必要であることがわかる。これは、流星バースト伝送路の平均発生間隔が短いと、マスタ局と複数のリモート局との間に、同時に伝送路が生じやすくなり、それに伴い各リモート局からマスタ局へ送信された DP が衝突しやすくなるためである。一方、式 (20) を用いて p を常に最適値に制御することにより、流星バースト伝送路の平均発生間隔が短いほど、すべてのリモート局がデータの伝送に成功するまでの時間が短くなっていることがわかり、また、どの流星バースト伝送路の平均発生間隔においても、データ収集完了時間が短くなっていることがわかる。これより、DP の衝突を軽減できていることがわかる。

5.2 ランダム遅延時間方式

ランダム遅延時間方式 I および II における、流星バースト伝送路の平均発生間隔 $1/l$ に対する \bar{T}_{all} の変化を図 4 に示す。図中の一点鎖線は $r_D = r_P = 10[\text{sec}]$ で一定とした場合の理論値を表している。○、□印は r_D および r_P をそれぞれ $10[\text{sec}]$ で一定とした場合のシミュレーション値を、△、▽印は r_D および r_P をそれぞれ最適値に制御した場合のシミュレーション値を表している。

$r_D = r_P = 10$ 一定の場合は、4.3 で示した理論通り、両方

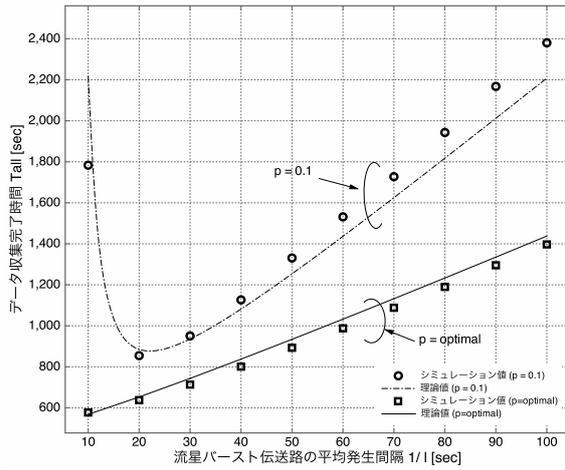


図3 \bar{T}_{all} VS. $1/l$ (ランダム送信方式)

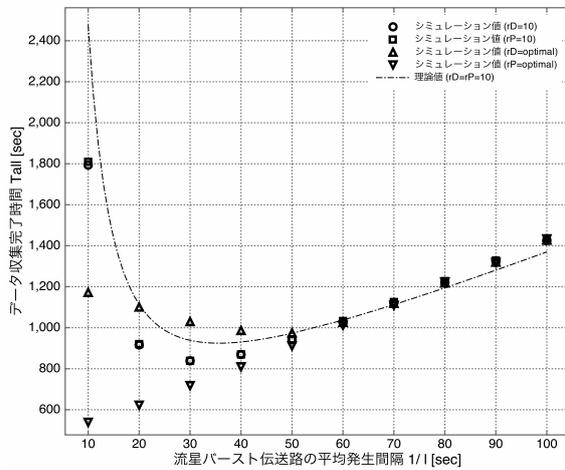


図4 \bar{T}_{all} VS. $1/l$ (ランダム遅延時間方式)

式のシミュレーション結果がほぼ一致することが確かめられる。

ランダム遅延時間方式 II の場合、 r_P を最適に制御することにより、ランダム送信方式の場合と同様、流星バースト伝送路の平均発生間隔が短いほどデータ収集完了時間を短くできることがわかる。一方、ランダム遅延時間方式 I の場合、DP 送信時にのみ r_D を制御するため、各時点の DP 送信確率が最適値からずれてしまう。そのため、残りのリモート局数 n の変化が速い、 $1/l$ が小さな場合にランダム遅延時間方式 II より特性が劣化する。

5.3 各方式の比較

図3と4を比較すると、ランダム送信方式およびランダム遅延時間方式 II において、それぞれ p および r_P を最適に制御したときのシミュレーション値は、どの平均発生間隔においてもほぼ同じ値であることがわかる。また、ランダム遅延時間方式 I において r_D 、 r_P を一定とした場合、ランダム送信方式において p を一定とした場合に比べ、 $1/l$ が大きくなってもデータ収集完了時間の増加が少なく、 r_D を最適に制御した場合に近い特性が得られることがわかる。

6. まとめ

本稿では、MBC 網を用いた遠隔モニタリングシステムに適したデータ伝送プロトコルとして、ランダム送信方式およびランダム遅延時間方式を提案した。また、ランダム送信方式の DP 送信確率 p およびランダム遅延時間方式の指数分布遅延時間の平均 r_D 、 r_P の最適制御法を理論解析によって示した。そして、各パラメータを最適値に制御することにより、それらを一定とした場合に比べ、DP の衝突を軽減させ性能を向上させることを理論解析および計算機シミュレーションにより示した。また、各パラメータを最適値に制御した場合において、ランダム送信方式とランダム遅延時間方式 II は、ほぼ同等な性能であることが示された。

文 献

- [1] J.Z.Schanker, Meteor Burst Communication, Artech House, Boston 1990.
- [2] 福田 明, 流星バースト通信, コロナ社, 1997.
- [3] 椋本, 福田, “流星バースト通信による観測データの収集システム,” 信学論 (B), vol.J68-B, no.6, pp.670-677, June 1985.
- [4] 長澤, 椋本, 福田, “流星バースト通信によるデータ収集システムの特性解析,” 信学論 (B-I), vol.79-B-I, no.6, pp.424-435, June 1996.
- [5] 長澤, 椋本, 福田, “流星バースト通信におけるプローブ電力と通信路特性の関係,” 信学論 (B-II), vol.J81-B-II, no.11, pp.1038-1047, Nov. 1998.