

# 受信強度の指数減衰を考慮した流星バースト通信路モデルの検討

金子 裕哉<sup>†a)</sup>      長澤 正氏<sup>††</sup>

A Study on Meteor Burst Channel Model Considering Received Signal Strength with Exponential Decay

Yuya KANEKO<sup>†a)</sup> and Masashi NAGASAWA<sup>††</sup>

あらまし 流星バースト通信路のモデルの一つである ON-OFF 交代モデルは、取扱いが簡単なため、おおよその通信容量の見積もりやプロトコルの考察などに使用されている。しかし、一関・沼津間でトーン送信とパケット伝送実験を行った結果、ON-OFF 交代モデルによる平均パケット受信間隔の予測は伝送レートの変化に対応することが難しいことがわかった。そこで本研究にて、伝送方式に柔軟に対応できる流星バースト通信路モデルとして、ON-OFF 交代モデルの取扱いの容易さに加え受信信号電力が指数減衰するという流星バースト通信路の性質を考慮した指数減衰交代モデルを提案する。提案モデルは、トーン送信実験によって調べた伝送路の特性をもとに、パケット受信間隔の推定やプロトコルの考察を行うことができる。提案したモデルからパケット受信間隔を求め、これが実験結果と一致する事を確かめた。また、シミュレーションと比較することで、提案モデルによる平均パケット受信間隔の予測は伝送レートの変化にも対応できることを確かめた。

キーワード 流星バースト通信, 通信路モデル, 無線パケット通信, 通信路発生間隔

## 1. ま え が き

流星バースト通信 (MBC: Meteor Burst Communication) は、流星が大気圏に突入した飛跡に残る電離気体柱による低 VHF 帯電波の反射現象を利用した見越し外通信である (図 1)。通信路の発生は確率的だが、最大約 2000 [km] の見越し外通信が可能であり [1], 衛星通信に比べシステムが安価に構成でき運用も容易なため、即時性を要さない小容量のデータ通信に適した通信方式である。主に通信インフラが整っていない僻地からの気象データ収集に利用され、実用例にアメリカのロッキー山脈における積雪量観測データ収集システム SNOTEL (SNOW TElemetry) が挙げられる。本研究の目的は、伝送方式の変化に柔軟に対応できる流星バースト通信路モデルを提案すること

である。

流星バースト通信路の発生間隔や継続時間は確率的であり、パケット長やプロトコルなどの研究には文献 [2] で提案された交代モデルが通信路モデルとして使われてきた [3]。この通信路モデルを、本研究で提案する指数減衰交代モデルと区別するため、本論文では ON-OFF 交代モデルと呼ぶ。本研究で行った一関・沼津間のトーン送信とパケット伝送の同時実験の結果より、ON-OFF 交代モデルにもとづいた平均パケット受信間隔は通信路の検出スレッシュホールドに強く依存し、伝送レートを変化させた場合、適切なスレッシュホールドを新たに実験やシミュレーションから同定する必要が

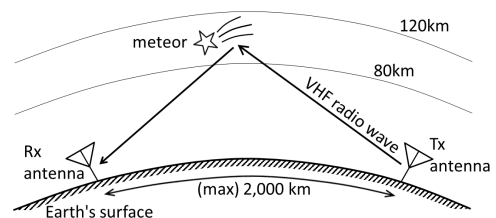


図 1 流星バースト通信

Fig. 1 Meteor burst communication.

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 生駒市  
Graduate School of Information Science, Nara Institute of  
Science and Technology, Ikoma-shi, 630-0192 Japan

<sup>††</sup> 沼津工業高等専門学校電子制御工学科, 沼津市  
Department of Electronic Control System Engineering, Nu-  
mazu College, National Institute of Technology, Numazu-  
shi, 410-8501 Japan

a) E-mail: kaneko.yuya.kr2@is.naist.jp

あることがわかった。このことは、例えば1パケットで伝送したい bit 数が与えられたときに、平均パケット受信間隔を最も短くする伝送レートを求めたいときには不利である。筆者らはこの原因を、ON-OFF 交代モデルは確立した通信路が存在する場合エラーフリーとし、伝送レートの変化に伴う BER (Bit Error Rate) の変化を考慮できないためではないかと考え、受信信号電力から求められる BER を考慮することで ON-OFF 交代モデルの問題点を解決できると考えた。

受信信号電力を考慮するため、流星バースト通信路による反射波の多くは受信信号電力が指数減衰するという性質から、受信信号電力が指数減衰としたモデルを指数減衰交代モデルとして提案する。提案モデルから平均パケット受信間隔を求め、これが実験結果と一致する事を確かめる。また、実験データを用いたシミュレーションと比較することで、提案モデルによる平均パケット受信間隔の予測は伝送レートの変化にも対応できることを確かめる。

## 2. 実験概要

### 2.1 概要

表 1 に実験の諸元を示す。実験は一関高専から沼津高専へ一方向で、毎時 5,25,45 分から 4 分間パケット伝送、毎時 15,35,55 分から 3 分間トーン送信を行った。パケット伝送の変調方式は BPSK (Binary Phase Shift Keying)、搬送波周波数は 48.375 [MHz]、伝送レートは 2400 [bps] で、108 [bit]、45 [ms] のデータパケットを 145 [ms] ごとに伝送した。図 2 にパケット構造を示す。トーン送信の変調方式は上側単側波帯変調方式でトーン周波数は 1200 [Hz] とした。本研究

表 1 実験の諸元

Table 1 Specification of the experiment.

送信局位置	岩手県 一関市 一関高専
受信局位置	静岡県 沼津市 沼津高専
直線距離	約 470km
アンテナ	5 素子八木アンテナ
送信電力	100 [W]
送信周波数	48.375 [MHz]

Bit number	Pre-amble	Start Flag	Packet Type	Master ID	Serial No.	Data	CRC8	Post-amble
	2	8	4	2	2	80	8	2

図 2 パケット構造

Fig. 2 Packet structure.

では、トーン送信実験のデータは 2011 年 10 月 19 日から 2011 年 12 月 23 日まで、パケット伝送は遅れて開始したためパケット伝送実験のデータは 2011 年 11 月 4 日から 2011 年 12 月 23 日までの結果を使用した。

### 2.2 実験・解析結果

流星バースト通信路の発生間隔と継続時間はそれぞれ独立で、どちらもおおよそ指数分布をなすことが知られている [1] ので、トーン送信実験の結果から得られるヒストグラムより流星バースト通信路の平均発生間隔と平均継続時間が求められる。トーン送信実験では先行研究 [4] と共通した信号処理を行った。観測は断続的に行っているが、記録したデータをつなげることで連続して観測を行った場合と同様に発生間隔を計算した。流星バーストの発生がポアソン過程であると仮定すれば、観測期間を分割・結合しても元の過程と同じ統計的性質をもった計数過程になり、発生間隔も元の過程と同じパラメータの指数分布になる。通信路の検出スレッシュホールドは帯域幅 2400 [Hz] 分の雑音電力に対する信号電力の比とした SN 比を使用した。

図 3 に通信路の発生間隔の分布、図 4 に通信路の継続時間の分布の一例を示す。これらは検出スレッシュホールド 7 [dB] の結果で、検出した通信路の総数は 1120 個、平均発生間隔は 1618.7 [s]、平均継続時間は 0.215 [s] であった。これら指数分布の平均値  $1/\lambda$  は図 3, 4 のグラフの傾き  $-\lambda \log_{10} e$  から求めた。指数分布のヒストグラムの傾きと平均値の関係の詳細は付録に示す。ヒストグラム作成にあたり、階級の幅は後に示す直線

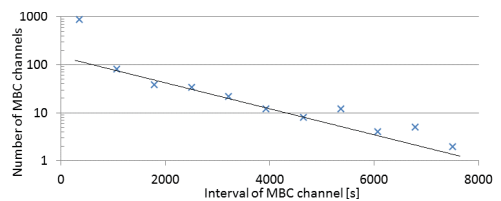


図 3 通信路の発生間隔のヒストグラム

Fig. 3 Histogram of interval of channel.

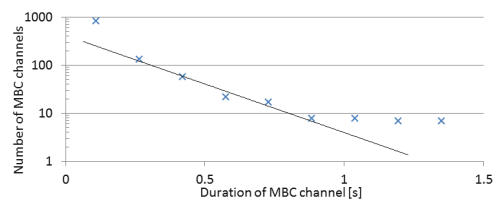


図 4 通信路の継続時間のヒストグラム

Fig. 4 Histogram of duration of channel.

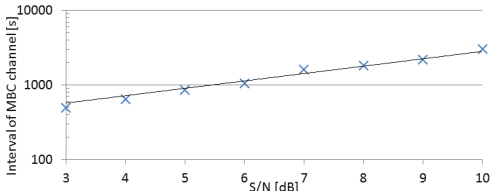


図 5 検出スレッシュولدに対する通信路の平均発生間隔  
Fig. 5 Interval vs. detection level.

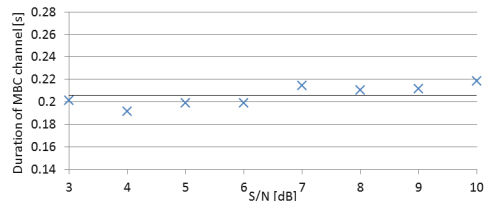


図 6 検出スレッシュولدに対する通信路の平均継続時間  
Fig. 6 Duration vs. detection level.

近似が十分な精度で行えるよう選んだ。図 3 では階級の幅は 715 [s]，図 4 では 0.15 [s] とした。質量の大きい流星が作るオーバードレンスバーストが，フェージングの影響で短い継続時間の通信路が短い間隔で複数発生したように計数されることがある [5]。これにより階級値が最も小さい第 1 の階級は頻度が突出するが，これは通信路の発生とは別の性質によるものであるため，文献 [5] と同様にこの点は直線近似するには使用しない。また頻度が 10 以下と小さい場合は誤差の影響が大きくなるためこれも直線近似には使用しない。図 3 では，第 2 から第 6 の階級を用いて，図 4 では第 2 から第 5 の階級を用いて最小 2 乗法で直線近似した。

流星バースト通信路の平均発生間隔は検出スレッシュولد [dB] に対して指数的に増大すると言われており [5], [6]，今回の実験の結果からもそれを確認できた (図 5)。これは，基本的にはより大きい流星が突入したときほど強い通信路が発生するため，強い通信路は弱い通信路に比べて発生頻度が低くなるためである。一方，平均継続時間は検出スレッシュولدに対してほぼ一定である (図 6)。これは，スレッシュولدを大きくすると弱い通信路を標本に数えなくなり，逆にスレッシュولدを小さくすると各バーストの継続時間は増すが同時に小さなバーストも検出することになり継続時間の短い通信路も検出することになるため，スレッシュولدを超える通信路の継続時間の平均としては大きく変化しないためである。スレッシュولد 3 [dB] から 10 [dB] の平均は 0.206 [s] であった。

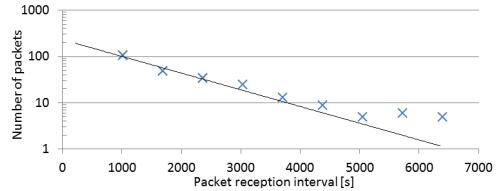


図 7 パケット受信間隔のヒストグラム  
Fig. 7 Histogram of packet reception interval.

パケット伝送実験からは，1 個以上パケットを正しく伝送した通信路の発生間隔及び，その通信路が開いている間に受信できたパケットの個数を知ることができる。今回の研究では，1 個以上パケットを正しく伝送した通信路の発生間隔に注目することにした。これは，想定している流星バースト通信の利用方法に，僻地からの気象データ収集や灯台設備などの稼働状況の確認を考えているためである。これらの利用方法では，伝送したい情報量は少ないが，ある程度の確率的な不確かさは許容しつつも定期的に一定時間内に 1 回は情報を収集したいといったような要求が多い。そのため，本研究では 1 個以上パケットを正しく伝送する通信路の発生間隔に注目した。また，本論文ではこの間隔を簡単にパケット受信間隔と呼ぶことにする。

パケット受信間隔も指数分布に従うと予想されるため，パケットを正しく受信した間隔について，トーン送信実験での流星バースト通信路の平均発生間隔と同様にヒストグラムを作成して平均間隔を求めた。図 7 に実験のパケット受信間隔のヒストグラムを示す。階級の幅は 670 [s] とした。一つの通信路が開いている間に連続して受信される場合があり，これは通信路の発生間隔ではないので，受信した間隔が短い場合の結果は平均発生間隔を求める際には考慮しないことにし，流星バースト通信路のヒストグラムの場合と同様，頻度が突出する第 1 の階級を除いて直線近似する。なお第 1 の階級の頻度は 2506 であった。また第 7 以降の階級も頻度が 10 以下と小さいため除いて直線近似した。パケットを正しく受信できた通信路の平均発生間隔は 1205 [s] で約 20 分であった。

### 3. 通信路モデル

#### 3.1 ON-OFF 交代モデル

##### 3.1.1 モデルの概要

流星バーストの発生と持続に関する物理現象を単純化して導かれた流星バースト通信路のモデルでは，与えられた 2 点間を結ぶ通信路は平均間隔  $1/l$  秒でポア

ソン生起し，継続時間は平均  $1/m$  秒の指数分布をなすとされる．このモデルは同時に二つ以上の通信路が発生する場合を表現できるが，解析が複雑になる．そこで，解析の容易な交代モデルが提案された [2]．このモデルを，本論文で提案するモデルと区別するため ON-OFF 交代モデルと呼ぶ．このモデルでは，二つ以上の通信路が発生した場合は干渉により通信不能とし，通信路が一つのみ存在するときはビットエラーが起きないエラーフリー状態としている．

ON-OFF 交代モデルでは，2 点間の通信路の状態は確立していない OFF 状態 ( $C_0$ ) と確立している ON 状態 ( $C_1$ ) のみをとる，その間をある遷移速度  $\mu, \nu$  で遷移するものとする (図 8)． $\mu, \nu$  は，前述の平均発生間隔  $1/l$  と平均継続時間  $1/m$  をパラメータにもつ一般的な流星バースト通信路のモデルで通信路が一つだけ存在する時間と，ON-OFF 交代モデルの確立した通信路が存在する時間とを等しくするよう

$$\mu = m + l, \nu = \frac{(m + l)l}{m} \frac{e^{-l/m}}{1 - \frac{l}{m}e^{-l/m}}, \quad (1)$$

と決められる．ある時刻 ( $t = 0$  とする) にリンクが状態  $C_1$  にあり，時刻  $t > 0$  で状態  $C_1$  にある確率  $p_{11}(t)$  はマルコフ連鎖の理論から

$$p_{11}(t) = (\nu + \mu e^{-(\mu+\nu)t})/(\mu + \nu), \quad (2)$$

となる．二局間で，一方向に一定間隔でパケットを送信し続ける場合を考える．パケット長  $a$  秒のパケットを  $a + b$  秒ごとに送信しているとする．このとき ON-OFF 交代モデルによって，パケットが受信されるまでの平均送信回数  $N_p$  及びパケットが受信されるまでの時間の期待値，すなわち平均パケット受信間隔  $T_p$  が求められる [2]． $T_p$  の計算に必要となる，観測を始めて 1 番目に送るパケットが伝送に成功する確率  $P(1)$ ，1 番目のパケットが成功した条件下で 2 番目のパケットが成功する条件付き確率  $P(2|1)$ ，1 番目のパケットが失敗しかつ 2 番目のパケットが成功する同時確率  $P(2 \bar{1})$ ，1 番目のパケットが失敗した条件下で 2 番目のパケットが成功する条件付き確率  $P(2\bar{1})$ ，1 番

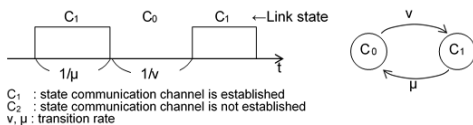


図 8 ON-OFF 交代モデル  
Fig. 8 2 states transition model.

目のパケットが失敗した条件下で 2 番目のパケットが失敗する条件付き確率  $P(\bar{2}|\bar{1})$  は，

$$\begin{cases} P(1) = \nu e^{-\mu a} / (\mu + \nu), P(2|1) = p_{11}(b) e^{-\mu a}, \\ P(2 \bar{1}) = P(1) \{1 - P(2|1)\}, \\ P(2\bar{1}) = P(2 \bar{1}) / P(\bar{1}), \\ P(\bar{2}|\bar{1}) = 1 - P(2 \bar{1}) / P(\bar{1}), \end{cases} \quad (3)$$

である． $N_p$  及び  $T_p$  は以下の式で与えられる．

$$N_p = P(1) + P(2 \bar{1}) \frac{\{2 - P(2\bar{1})\}}{\{1 - P(2\bar{1})\}^2}, \quad (4)$$

$$T_p = (N_p - 1)(a + b) + a. \quad (5)$$

### 3.1.2 実験による同定

実際の流星バースト通信路では受信信号電力は変動し，また SN 比が高くても復調に失敗する場合や SN 比が低くても復調に成功する場合などがある．しかし，ON-OFF 交代モデルはそのような詳細は無視し通信路が ON 状態ではエラーフリーとし，ON 状態中に完全に送信されたパケットは復調に成功し，パケットの一部でも OFF 状態に入る場合は失敗としている．そのため，モデルによる解析と実際の実験結果とが一致するような通信路のパラメータを与える必要がある．

このような通信路の検出スレッシュホールドを決定するために，実際に実験を行って同定することができる．ON-OFF 交代モデルによる予測が実際の実験結果である平均受信間隔 20 分と一致するような通信路の発生間隔を求めると 700 秒程度であった．これは，検出スレッシュホールド 4 [dB] の通信路の発生間隔に相当する．したがって検出スレッシュホールド 4 [dB] の通信路のパラメータを使用した ON-OFF 交代モデルを用いて，実験したシステムが 1 時間以内にパケット伝送に成功する確率などのシステム特性を考察することができる．

### 3.1.3 ON-OFF 交代モデルの問題点

次に，パケットの送信条件を変えた際の平均受信間隔をシミュレーションと比較した．パケットの送信条件は，まず 1 パケットの bit 数は 108 [bit] で一定とした．これより伝送レート  $R$  [bps] に対しパケット長  $a = 108/R$  と決められる．休止期間  $b$  は，伝送レート 2400 [bps] のとき実験時と同じ条件になるように決める．具体的には，伝送レートを変えたときに  $a$  と  $b$  の比が変わらないように次の式を満たすように決めた．

$$\frac{a}{a + b} = \frac{108/2400}{145 \times 10^{-3}}. \quad (6)$$

このようにパケット送信条件を決めると，単位時間あ

たりのパケット送信個数に差が出るが、後に休止期間  $b$  の間にパケットを受信した側からの返答が送られることを検討するために、休止期間を含めて伝送レートを変えた。BPSK であるためここで言う伝送レートは変調速度に等しい。

シミュレーションは次のように行った。まずトーン送信実験の観測データから、各時刻の SN 比  $S/N$  が求められる。次に、トーンの代わりに同時にパケットが一定間隔で送信されていたと仮定し、各 bit の 1bit 当たりの信号エネルギー対雑音電力密度比  $E_b/N_0 = (S/N)/(R/B)$  から各 bit の BER を求める。  $B$  は雑音電力帯域幅で今は 2400 [Hz] である。BPSK の同期検波では誤差補関数  $\text{erfc}(\cdot)$  を用いて  $\text{BER} = (1/2) \text{erfc}(\sqrt{E_b/N_0})$  と計算できる。パケットの全 bit が成功する確率に従って各パケットが復調成功か失敗かを判別した。平均パケット受信間隔は図 7 と同様なヒストグラムから求めた。

図 9 に、伝送レートに対して式 (6) の条件でパケット送信間隔を決めたときの、検出スレッシュホールド 4 [dB] 及び 5 [dB] の通信路発生間隔に基づいた ON-OFF 交代モデルと、トーン実験のデータを用いてシミュレーションした結果での平均パケット受信間隔を示す。伝送レートを上げることでパケット送信時間を短くできるためパケットの送信途中で通信路が消失する確率が下がるが、BER が大きくなるため復調の成功確率も下がる。一方伝送レートを下げれば復調の成功確率は上がるがパケットの送信途中で通信路が消失する確率も上がると考えられる。そのトレードオフの結果シミュレーションから求めた平均パケット受信間隔は伝送レートに対し下に凸の傾向を示している。実験結果をもとに同定した検出スレッシュホールド 4 [dB] の ON-OFF 交代モデルは、2400 [bps] の結果はシミュレーションと一致するが、伝送レートを変えた場合は

一致しない。検出スレッシュホールド 5 [dB] の ON-OFF 交代モデルは 3000 [bps] の結果と一致する。伝送レートを下げたときは ON-OFF 交代モデルを同定する通信路の適切な検出スレッシュホールドも下がり、伝送レートを上げたときは適切な検出スレッシュホールドも上がるという傾向の予測はできるが、具体的にその検出スレッシュホールドを定めるには実験を行う必要がある。このことは、例えば 1 パケットで伝送したいデータ量が与えられたときに、平均パケット受信間隔を最も短くする伝送レートを求めたいときなどには不利である。

### 3.2 指数減衰交代モデル

#### 3.2.1 モデルの提案

ON-OFF 交代モデルは通信路が存在するときはエラーフリーと考えるため、パケット長や伝送レートによって適切な検出スレッシュホールドが変化し、伝送方式の変化に対応することが難しい。伝送方式の変化に柔軟に対応できるように、通信路の存在の有無に加えて受信信号電力の変化を考慮したモデルを提案する。

流星バーストの大部分は質量が小さい流星によって発生するアンダーダンスバーストである。流星バースト通信を利用したシステム特性の解析も主にアンダーダンスバーストの利用を想定したものが多い [1]。アンダーダンスバーストで反射された電波の受信信号電力は発生時をピークに指数減衰することが知られており、多くの研究がこの仮定のもと行われている [7], [8]。

そこで ON-OFF 交代モデルではエラーフリーとした通信路を、その SN 比が指数的に減衰するものとし、1bit ごとのエラー発生率を考慮するモデルを指数減衰交代モデルとして提案する (図 10)。送信電力が変化する場合 [7] も適用対象とするためモデルの定義では流星バーストの電力反射率を考えるが、本論文では一定送信電力、一定電力の加法的白色ガウス雑音 (AWGN) のみ扱うため反射率、受信電力、SN 比は互いに比例する。指数減衰交代モデルの仮定は次のとおりである。

- 通信路は ON-OFF 交代モデルと同様に、流星バースト通信路がただ一つ存在する状態と確立した通

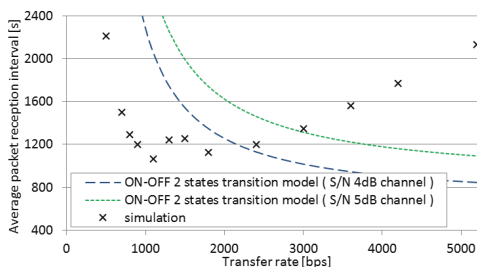


図 9 伝送レートに対するパケット受信間隔  
Fig. 9 Interval of receiving packet vs. transfer rate.

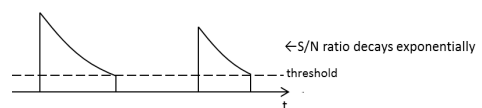


図 10 指数減衰交代モデル  
Fig. 10 2 states transition model with exponential decay.

信路が存在しない状態をとる.

- 通信路が存在する状態では流星バーストの反射率は指数的に減衰する.

- 指数減衰の時定数  $\tau$  は一定とする.
- 反射率があるスレッシュヨルドまで下がると通信路が存在しない状態へと遷移する.

- 反射率の初期値は通信路継続時間が指数分布となるよう,  $\exp(t_c/\tau)$  に比例する確率変数とする.  $t_c$  は指数分布に従う確率変数である.

通信路が存在する間にパケットが完全に送信できる確率や連続して送信されるパケットの個数などは ON-OFF 交代モデルの解析結果を利用できる. 例えば本論文では式 (5) の ON-OFF 交代モデルにおける平均パケット受信間隔を, 通信路が存在する間に完全に送信されるパケットの間隔として利用する. 更に, 通信路が開いている間の SN 比の変化を記述できるため変調方式などの変化に対応した解析が行える. また, 通信路の SN 比の変動を考慮した適応的変調方式 [7], [8] の評価にも提案モデルが利用できると考えられる.

### 3.2.2 パケット受信間隔の解析

指数減衰交代モデルによる平均パケット受信間隔の解析を行う. まず ON-OFF 交代モデルと同様にして, 確立した通信路が存在している間にパケットが完全に送信されるという事象の平均発生間隔  $T_p$  を式 (5) より求める. この事象はポアソン生起すると考えられる. このとき通信路がエラーフリーとは考えず, パケットは伝送に成功する可能性があるというだけである.

次に, 受信信号電力が指数減衰する通信路上でのパケットの受信成功確率  $P_{cm}$  を求める. これにより, 先に求めた伝送に成功する可能性のあるパケットのうち何割が成功するのかを求められる. パケットの受信に成功する間隔は ON-OFF 交代モデルにおける間隔の  $1/P_{cm}$  倍になると考えられ, 平均パケット受信間隔は  $T_p/P_{cm}$  で与えられる. 同一通信路上で完全に送信されるパケットのうちどれが受信成功するかにより厳密には受信間隔は変わるが, パケット送信間隔は通信路発生間隔に比べ短いためこのことは無視する.

以上の仮定のもとパケット受信成功確率の解析を行う. まず通信路の SN 比の指数減衰の時定数  $\tau$  を一定と仮定してこれを求める. 流星バーストに反射された受信信号電力  $P_R$  が次のように表されるとする.

$$P_R = P_p \exp(-t/\tau). \quad (7)$$

ここで,  $t$  は流星バーストが発生してからの時間,  $P_p$  はピーク電力である. 受信信号電力が検出スレッシュヨルド  $T_h$  より大きい時間の平均値, つまり通信路の平均継続時間  $1/m$  はピーク分布定数  $\beta$  を用いて

$$1/m = \tau/\beta, \quad (8)$$

と書ける [5]. 平均継続時間はトーン送信実験から求められているため, 定数  $\beta$  を求めれば減衰の時定数  $\tau$  も求められる.  $\beta$  は, ある 2 地点間における流星バースト通信路の平均発生間隔  $1/l$  が送信電力の  $-\beta$  乗に比例する [6] ことから求められる. 送信電力を変化させ一定スレッシュヨルドで検出することと, 一定電力で送信し検出スレッシュヨルドを変化させることは等価であり [5], 検出スレッシュヨルド  $T_h$  に対しては

$$1/l \propto (1/T_h)^{-\beta}, \quad (9)$$

と書け, 図 5 の傾きから  $\beta$  を求められる.  $\beta$  の値は 0.5 から 1.2 程度の値になると言われている [6]. 今回の実験では  $\beta$  は 0.9906 でその範囲に収まっている.

次に, 通信路が開いている間にパケットが 1 個以上完全に送信された場合に, 少なくとも 1 個のパケットが成功する確率を求める. 継続時間  $t_c$  は平均  $1/m$  の指数分布に従うとする. 検出スレッシュヨルドの SN 比を  $\rho_{th}$  とし, 前述のとおり受信信号電力が指数減衰することを仮定すると継続時間  $t_c$  から受信信号 SN 比のピーク値  $\rho_p$  を  $\rho_p(t_c) = \rho_{th} \exp(t_c/\tau)$  と逆算できる.

伝送レート  $R$  の BPSK 変調で, パケット長  $a$ , パケットの bit 数  $N_b$  のパケットを  $a+b$  秒ごとに送信しているとする. パケット長  $a = N_b/R$  である.

通信路が発生してから初めてパケットが送信開始されるまでの時間を  $t_r$  とする.

通信路が存在している間に完全に送信されるパケットの数  $N$  は床関数  $[\cdot]$  を用いて以下のように表せる.

$$N = 1 + [(t_c - t_r - a)/(a + b)]. \quad (10)$$

通信路が存在している間に完全に送信されたパケットのうち,  $n$  番目のパケットの  $n_b$  [bit] 目の bit の  $E_b/N_0$  を  $\gamma$ , 雑音電力帯域幅を  $B$  とすると,

$$\begin{aligned} & \gamma(n, t_r, t_c, n_b) \\ &= \frac{\rho_p(t_c)}{B/R} \exp\left(-\frac{t_r + (n-1)(a+b) + \frac{n_b}{R}}{\tau}\right), \quad (11) \end{aligned}$$

と書ける. 受信信号電力は指数減衰し単調減少する

ため、パケットの成功確率は最低限の予想となるよう 1 [bit] が完全に送信された点での SN 比を参照することにした。  $n$  番目のパケット一つの成功確率  $P_s$  は

$$P_s(n, t_r, t_c) = \prod_{n_b=1}^{N_b} \left\{ 1 - \frac{\operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma(n, t_r, t_c, n_b)})}{2} \right\}, \quad (12)$$

と書ける。通信路が存在している間に  $N$  個のパケットが送信されるため、  $t_r$  と  $t_c$  が定まったある通信路上で少なくとも 1 個のパケットが成功する確率  $P_c$  は以下のように書ける。

$$P_c(t_r, t_c) = \prod_{n=1}^N \{1 - P_s(n, t_r, t_c)\}. \quad (13)$$

$t_r$  と  $t_c$  はある分布をもった確率変数である。  $N \geq 1$  という条件付きでの  $t_r$  と  $t_c$  の同時確率密度関数が与えられれば  $P_c$  の平均として、通信路が存在する間に 1 個以上パケットが完全に送信されたとき少なくとも 1 個のパケットが受信成功する確率が求められる。

パケットは通信路の発生とは独立に  $a + b$  秒周期で送信されているため、  $t_r$  は 0 から  $a + b$  秒までの一様分布である。  $t_c$  は前述のとおり平均  $1/m$  の指数分布に従う。  $t_r$  と  $t_c$  は独立であるからその同時確率密度関数はそれぞれの確率密度関数の積で与えられる。

この同時確率密度関数で与えられる  $t_r$  と  $t_c$  のうち、  $N \geq 1$  となる領域を考える。すると、通信路が発生してから初めてパケットが送信されるまでの時間  $t_r$  とパケット長  $a$  の和が通信路の継続時間  $t_c$  より長い場合は、通信路が存在する間にパケットが完全に送信されない。よって、  $t_c < (t_r + a)$  では確率密度 0 となり切断される。その他の範囲では、  $t_r$  と  $t_c$  が独立な場合の同時確率密度関数と同形であると考えられるから、全領域で積分して 1 になるように係数を決めて、目的の条件付き同時確率密度関数  $f$  は

$$f(t_r, t_c | N \geq 1) = \begin{cases} \frac{me^{-mt_c}}{c(a+b)} & (a \leq t_c, 0 \leq t_r \leq \min(a+b, t_c-a)) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (14)$$

ただし  $c$  は以下の定数である。

$$c = \int_a^\infty \int_0^{\min(a+b, t_c-a)} \frac{me^{-mt_c}}{a+b} dt_r dt_c. \quad (15)$$

以上のことを用いて、通信路が開いている間に 1 個

以上パケットが完全に送信されたとき、少なくとも 1 個のパケットが受信成功する確率  $P_{cm}$  は  $P_c$  を平均し

$$P_{cm} = \int_0^\infty \int_0^\infty P_c(t_r, t_c) f(t_r, t_c | N \geq 1) dt_r dt_c, \quad (16)$$

として求められる。

### 3.2.3 実験結果によるモデルの妥当性の検証

図 11 に実験における PER ( Packet Error Rate ) を、SN 比がスレッシュホールドで一定とした場合及び指数減衰交代モデルによる理論 PER と比較したものを示す。図 2 の先頭 10bit すなわちプリアンプルとスタートフラグが確認でき、更に全 bit の SN 比が  $r$  [dB] 以上だったパケットの総数を  $N_p$ 、そのうち全 108 [bit] が正しく復調できたパケットの総数を  $N_s$  として  $\text{PER} = N_p / N_s$  として実験の PER を定義した。横軸の SN 比は  $r$  を指す。スレッシュホールドが低い範囲では指数減衰交代モデルによる理論 PER は実験結果とよく一致する。SN 比がスレッシュホールド以上のあるピークから指数減衰する場合スレッシュホールドよりも高い SN 比の期間が多く、SN 比がスレッシュホールドで一定の場合より PER は小さいが、検出スレッシュホールドを大きくすると質量の小さい流星が作るアンダーデンスバーストの割合は減少し、指数減衰するという仮定は成り立たなくなる。スレッシュホールドを大きくすると質量の大きい流星すなわち複雑なフェージングをするオーバーデンスバーストの割合が増えスレッシュホールド程度の SN 比の期間が多くなり、これが PER を決定するようになる。そのため PER の実測値は検出スレッシュホールドを大きくすると SN 比がスレッシュホールドの値で一定とした場合に近づいていく。

指数減衰交代モデルによって平均パケット受信間隔を  $T_p / P_{cm}$  として求める。図 12 に、実験と同じ条件でパケットを送信した場合の、ON-OFF 交代モデル

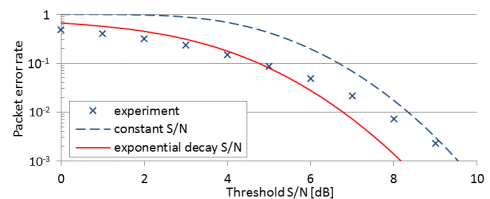


図 11 SN 比一定及び指数減衰交代モデルを用いた PER 特性

Fig. 11 Packet error rates obtained by using constant SNR and 2 states transition model with exponential decay.

と指数減衰交代モデルによる検出スレッシュホールドに対する平均パケット受信間隔の比較を示す。ON-OFF 交代モデルでは通信路が存在している間に送信されたパケットは全て受信されるとして扱っているため、検出スレッシュホールドを下げれば予想される受信間隔も単純に短くなる。検出スレッシュホールドの違いに結果は大きく左右され、ある 1 点でしか実測値と一致せず、適切な検出スレッシュホールドを厳格に選ぶ必要がある。一方、指数減衰交代モデルでは通信路の SN 比と受信成功率を考慮しているため、検出スレッシュホールドを下げて通信路の発生間隔が短くなっても、受信成功率が下がりパケットの受信間隔は一定値に収束するような形になる。指数減衰交代モデルの 0 [dB] での受信間隔は 1199 [s] であり、実際の実験結果である 1205 [s] とよく一致した。また 0 から 2 [dB] ではほとんど差がなく検出スレッシュホールドの選択に ON-OFF 交代モデルほどの厳格さは必要ない。ただしどちらのモデルでも検出スレッシュホールドを大きくすると、受信に成功する確率があるパケットを無視するケースが多くなり、予想される受信間隔は実際の値より大きくなってしまふ。このとき指数減衰交代モデルの結果が ON-OFF 交代モデルの結果に近づくのは検出スレッシュホールドを大きくすることでエラーフリー通信路に近い性質をもつためである。SN 比が低くてもパケットの受信に成功する可能性はあり、検出スレッシュホールドを低くすることでそれらのパケットを考慮できるようになるため、指数減衰交代モデルにおける通信路の検出スレッシュホールドは、流星バースト通信路の発生が認められる範囲なるべく低い値がよい。また図 11 において SN 比が低い範囲では指数減衰交代モデルによる PER の計算が実測値と一致したことからも検出スレッシュホールドは低くするのが妥当と考えられる。

図 13 に、伝送レートに対し式 (6) の条件で送信間隔を決めたときの、検出スレッシュホールド 0 [dB] の指数減衰交代モデルと、検出スレッシュホールド 4 [dB] の ON-OFF 交代モデルと、トーン実験のデータを用いたシミュレーションそれぞれの平均パケット受信間隔を示す。指数減衰交代モデルとシミュレーションの結果がよく一致し、伝送レートを変化させたときも通信路の検出スレッシュホールドを変えずとも妥当な予測を与えることが確認できた。また、この条件では伝送レート 1200 [bps] 程度が最も平均受信間隔を短くすることがわかった。

本論文では伝送レートが変化する場合について ON-

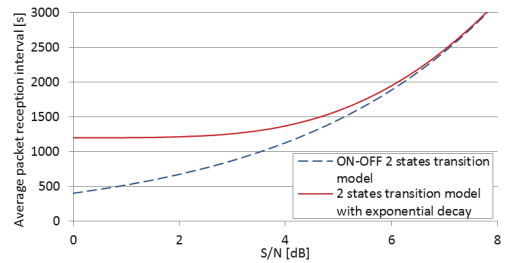


図 12 ON-OFF 交代モデルと指数減衰交代モデルの平均パケット受信間隔の比較

Fig. 12 Comparison of packet reception interval between ON-OFF 2 states transition model and modified model with exponential decay.

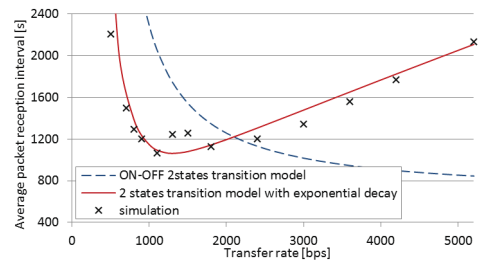


図 13 伝送レートに対する平均パケット受信間隔（送信間隔と休止期間の比一定）

Fig. 13 Average packet reception interval vs. transfer rate.

OFF 交代モデルと指数減衰交代モデルを比較したが、変調方式が変化する場合も SN 比に対する BER が変化するという等価な問題とみなせるため、指数減衰交代モデルはその変化に対応できると考えられる。

#### 4. む す び

本研究では、伝送方式の変化に柔軟に対応できる流星バースト通信路モデルとして指数減衰交代モデルを提案し、その妥当性を検証した。

まず一関・沼津間でトーン送信とパケット伝送実験を行い、トーン送信実験から通信路の特性を観測した。次に、流星バースト通信路のモデルの一つである ON-OFF 交代モデルをもとに平均パケット受信間隔を求めた。しかし、ON-OFF 交代モデルを実測値と同定する適切なパラメータは伝送レートによって変化してしまい、ON-OFF 交代モデルは伝送レートの変化に対応することが困難であることを確認した。そして、受信信号電力が指数減衰することを考慮した指数減衰交代モデルを提案し、これにより求めたパケット受信間隔が実験結果と一致する事を確かめた。最後に、



伝送レートを変化させた際の平均パケット受信間隔を実験データを用いたシミュレーションと比較し、提案したモデルの妥当性及び伝送方式の変化に対応できることを確認した。

本研究では一定間隔かつ一定の伝送レートで一方方向に送信するパケットの受信間隔を考えたが、実際の流星バースト通信では、主局から従局へ流星バースト通信路の有無を探索するプローブパケットを送信し、プローブパケットを受信した従局がデータを主局へ返送するなどといったプロトコルや、適応的変調を行うシステムがある。特に適応的変調方式の研究ではバースト当たりの伝送量の解析はなされていてもパケット長や受信間隔、プロトコルに関する解析が少なく、今後はこのような流星バースト通信特有のプロトコルや、適応的変調方式を行うシステムの動作を検討する。

謝辞 実験に御協力いただいた一関高専、管隆寿准教授、並びに本論文執筆にあたり多くの御助言を頂いた静岡大学工学部、椋本介士博士に謝辞を示す。

## 文 献

- [1] 福田 明, 流星バースト通信, コロナ社, 1997.
- [2] 福田 明, 山島弘之, 椋本介士, “流星バースト通信による双方向メッセージ伝送システムの特性,” 信学論 (B-I), vol.J76-B-I, no.2, pp.119-128, Feb. 1993.
- [3] 長澤正氏, 椋本介士, 福田 明, “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), vol.J79-B, no.6, pp.424-435, June 1996.
- [4] 長澤正氏, 椋本介士, 福田 明, 安昭吉廣, 中野 啓, 大市 聡, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 門倉 昭, H. Yang, M. Yao, S. Zhang, G. He, L. Jin, “トーン信号伝送による南極大陸の流星バースト通信路の観測実験について,” 信学技報, SANE2003-96, Jan. 2004.
- [5] 長澤正氏, 椋本介士, 福田 明, “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.
- [6] G.R. Sugar, “Radio propagation by reflection from meteor trails,” Proc. IEEE, vol.52, no.2, pp.116-136, 1964.
- [7] A. Al Jabri and F. Al Rohaily, “Adaptive power transmission schemes for meteor-burst communication,” Telesystems Conference, 1994. Conference Proceedings, 1994 IEEE National, pp.217-220, 1994.
- [8] J. Cai, Z. Li, X. Chen, and B. Hao, “An adaptive receiver of joint data and channel estimation for meteor burst communications,” Int. J. Commun. Syst., vol.24, no.6, pp.745-760, June 2011.

## 付 録

### 指数分布のヒストグラムと平均値の関係

確率変数  $x$  がパラメータ  $\lambda$  の指数分布に従うとき、

その確率密度関数は次式で与えられる。

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (\text{A}\cdot 1)$$

またこの平均は  $1/\lambda$ , 分散は  $1/\lambda^2$  である。指数分布に従う確率変数  $x$  の標本集団からパラメータ  $\lambda$  を導くには、ヒストグラムの片対数グラフの傾きを求めればよい。ヒストグラムの階級の幅を  $\Delta x$  としたとき、ある階級すなわちある微小区間  $n\Delta x$  から  $(n+1)\Delta x$  (ただし  $n > 0$ ) に標本が入る確率  $P_n$  は

$$\begin{aligned} P_n &= \int_{n\Delta x}^{(n+1)\Delta x} \lambda e^{-\lambda x} dx \\ &= (1 - e^{-\lambda\Delta x}) e^{-\lambda n\Delta x}, \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 2)$$

となる。総標本数  $N$  が十分大きければ、微小区間の頻度  $y(n)$  は

$$y(n) \simeq NP_n = N(1 - e^{-\lambda\Delta x}) e^{-\lambda n\Delta x}, \quad (\text{A}\cdot 3)$$

となる。両辺の自然対数をとると

$$\ln y(n) = \ln \left( N (1 - e^{-\lambda\Delta x}) \right) - \lambda n\Delta x, \quad (\text{A}\cdot 4)$$

となる。したがってヒストグラムの片対数グラフの傾きを求めれば

$$\{\ln y(n) - \ln y(n-1)\} / \Delta x = -\lambda \quad (\text{A}\cdot 5)$$

となり、パラメータ  $\lambda$  を求められる。式 (A.4) で常用対数をとった場合には

$$\begin{aligned} \log_{10} y(n) &= \log_{10} \left( N (1 - e^{-\lambda\Delta x}) \right) \\ &\quad - \lambda n\Delta x \log_{10} e, \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 6)$$

となり、ヒストグラムの傾きは

$$\{\log_{10} y(n) - \log_{10} y(n-1)\} / \Delta x = -\lambda \log_{10} e \quad (\text{A}\cdot 7)$$

となり、 $\log_{10} e$  で除せばパラメータ  $\lambda$  を求められる。

(平成 26 年 5 月 16 日受付, 9 月 30 日再受付)



金子 裕哉 (学生員)

平 25 沼津高専専攻科制御・情報システム工学専攻修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科入学。流星バースト通信, 光電波融合技術の研究に従事。学士 (工学)。



長澤 正氏 (正員)

昭 52 静岡大・工・電気卒. 昭 54 同大大学院修士課程了. 同年日本電気(株)入社. 電子計算機及び通信処理プロセッサの研究開発に従事. 平 2 沼津高専電子制御工学科講師, 平 6 同助教授. 平 13 同教授. 流星バースト通信の研究に従事. 工学修士.