

# マルチホップ伝送における周波数利用効率の 解析・評価

送受信局の間に位置する無線局が中継を行うマルチホップ伝送において、適応レート制御を行った場合の空間的無線周波数利用効率を解析および評価し、その効果を明らかにした。なお、本研究は京都大学大学院 情報学研究科 吉田研究室（吉田 進教授）との共同研究により実施した。

ふじわら あつし  
藤原 淳

## 1. まえがき

無線伝送を用いた各種サービスを展開するにあたり、「カバレッジ確保」および「周波数利用効率の最大化」というテーマは、限られた周波数資源という観点から非常に重要である。

一般に無線伝送は、装置による制約やさまざまな規制などにより、送信局の送信電力出力を無限に大きくできるわけではない。そのため、通信可能距離もまた無限に長くはできない。また、送受信局間において通信可能な距離であっても、利用可能な伝送ビットレートは受信電力におおむね比例するため、送受信局の距離が長くなるにつれて、伝送ビットレートは低くなる。この課題に対して、送受信局の間に位置する中継局を介して伝送を行う「マルチホップ伝送」は、通信可能範囲の拡大ならびに通信ビットレート向上のために有効な技術であり、その効果も明らかにされている[1][2]。

しかしながら、無線マルチホップ伝送は中継の際に周波数、拡散符号、タイムスロットなどの無線リソースを消費するため、システム容量については逆に低減することが懸念される。また、マルチホップ伝送は、シングルホップ伝送と比べて送信局の数が増えるため、多重アクセス制御の観点からの損失も懸念される。本研究では、これらの影響のうち、アクセス制御については理想的に動作する（すなわち多重アクセスによる損失がゼロである）という仮定で、マルチホップ伝送がシステム容量に与える影響を数式を用いて解明し、システム容量増大に大きく貢献できることを明確にしている。

## 2. マルチホップ伝送の帯域利用率

### 2.1 シングルホップ伝送における適応変調

本研究では、マルチホップ伝送時における無線周波数の利用効率を明確にすることを目的としている。そこで、評価の指標として周波数帯域当りの伝送ビットレートである「帯域利用率」を用いる。この帯域利用率に、使用する帯域幅を掛け合わせると、利用可能な伝送ビットレートが求められる。本節では、マルチホップ伝送の利用効率を明確にするため、図1(a)に示すようなシングルホップ伝送における利用効率を求める。

送受信局が直接伝送を行う「シングルホップ伝送」では、帯域利用率の上限はシャノン定理により厳密に定められている。受信局におけるSNR（Signal to Noise Ratio）が与えられた場合、帯域利用率 $f$ は式(1)で表される。

$$f = \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad (1)$$

この式は、「これ以上のビットレートでの伝送が不可能である」という理論的な限界を示しており、実際の無線伝送では、この式から得られる値より低いビットレートとなる。ここでは適応変調を行った場合の、より現実に近い伝送ビットレートのモデルとして4位相偏移変調（QPSK：

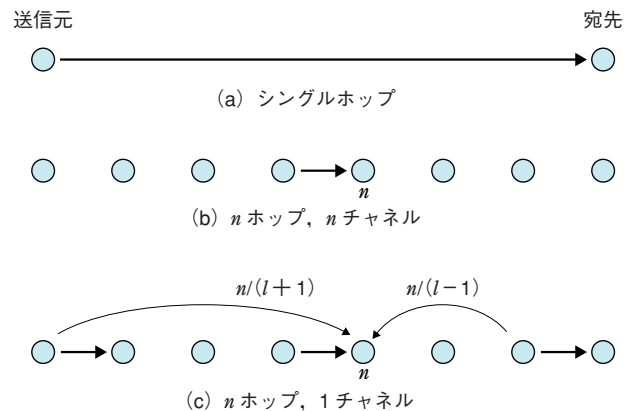


図1 マルチホップ伝送モデル

Quadrature Phase Shift Keying) から 64 直交振幅変調 (64QAM : 64 Quadrature Amplitude Modulation) での変調方式での近似式を使用する。本モデルでは、所要ビット誤り率 (BER : Bit Error Rate) を  $p_b$ , 受信キャリア信号対干渉雑音比 (CINR : Carrier to Interference and Noise Ratio) を  $\gamma$  とした場合に、シングルホップ時の帯域利用率  $f_1$  を式 (2) のように近似している。

$$f_1(\gamma, p_b) = \log_2(1 + \beta_1 \gamma) \quad (2)$$

ただし、 $\beta_1 = -1.5 / \ln(5p_b)$

QPSK より低い伝送レートについては、本モデルを用いることができないため、同じシンボルの繰り返し送信を仮定したモデルを用いる。以上の近似により、シングルホップ時の帯域利用率  $f_1$  は式 (3) で表される [3]。

$$f_1(\gamma, p_b) = \begin{cases} 2\beta_1 \gamma / 3 & 3/4 \beta_1 \leq \gamma < 3/\beta_1 \\ \log_2(1 + \beta_1 \gamma) & 3/\beta_1 \leq \gamma \leq 63/\beta_1 \end{cases} \quad (3)$$

## 2.2 チャネル再利用がない場合のマルチホップ伝送

マルチホップ伝送における帯域利用率の検討を行うにあたり、以下の仮定を用いる。中継を行う無線局は送受信局の間に均等に配置されているとする (図 1 (b))。また、チャネルの空間的再利用は行わない。これは、マルチホップ伝送においてホップ間の距離がいかなる値であっても、同一周波数同一時刻での送受信は行わないことを示している。すなわち、あるホップと他のホップの伝送では異なった時間、あるいは異なった周波数を用いて伝送するものとする。なお、時間で分離するか周波数で分離するかは議論の本質に影響しない。

$n$  ホップ伝送における各ホップの伝送距離はシングルホップ時に比べて  $1/n$  となるため、伝搬減衰定数を  $\alpha$  とすると各ホップでの受信 CINR はシングルホップ伝送時と比べて  $n^\alpha$  倍となる。また、 $n$  ホップ伝送時の送受信端で、シングルホップと同様の BER を満たすためには、各ホップでの BER は  $p_b/n$  より大きくなければならない。さらに、各ホップでの伝送において、空間的周波数再利用を行わないことにより、帯域利用率は各ホップの帯域の  $n$  倍となる。これらの要素を合わせることで、 $n$  ホップ時の帯域利用率  $f_n$  はシングルホップ時の帯域利用率  $f_1$  を用いて式 (4) で表される。

$$f_n(\gamma, p_b) = \frac{1}{n} f_1(\gamma n^\alpha, p_b/n) \quad (4)$$

この関係をグラフに表すと図 2 のようになる。横軸はあて先局における受信 CINR、縦軸は帯域利用率を示す。この図より、シングルホップ時において受信 CINR が 12dB 程度より大きい場合は、マルチホップ伝送による利得は生じないことがいえる。また、そうでない場合でも、帯域利用率を最大にできるホップ数が一意に定まることを示している。例えば受信 CINR が 4dB 程度では、シングルホップと比べて 2 ホップ伝送することにより、帯域利用率が大きく改善される (図中上方向の矢印)。

以上の議論で行ったマルチホップ伝送における帯域利用率は、各ホップでの CINR と所要 BER の 2 つの影響により定まる。マルチホップ伝送を前提とした場合の誤りの累積が帯域利用率に及ぼす影響を図 3 に示す。この図では、シャノン限界における帯域利用率も併せて表記している。この図から分かるように、所要 BER が異なった場合でも、所要の CINR に大きな影響を与えない。すなわち、マルチホ

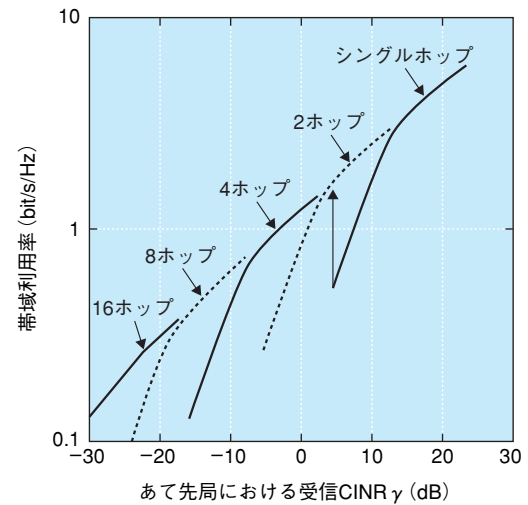


図2 マルチホップ伝送の帯域利用率

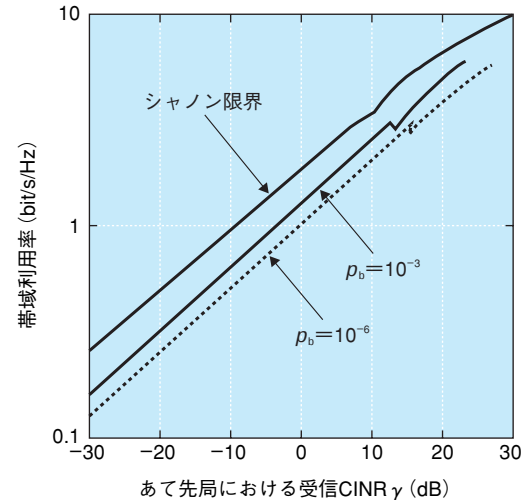


図3 誤りの累積が帯域利用率に及ぼす影響

ップ伝送における帯域利用率改善の主な要因は、受信CINRの変化であることが分かる。

## 2.3 チャネル再利用がある場合のマルチホップ伝送

$l$ 個の直交したチャネルを用いて $n$ ホップの伝送を行うと仮定する（図1(c)）。これは、各ホップを時分割で伝送する場合には、 $l$ ホップおきに同じタイミングで伝送することを意味する（周波数分割の場合は、 $l$ ホップおきに同じ周波数を用いる）。

このような仮定では、あるホップでの伝送において、 $l$ ホップ先、 $2l$ ホップ先、そしてさらにその先での伝送による干渉が発生する。その影響を考慮して帯域利用率を算出すると、チャネルの $n$ ホップ伝送時のホップ当りの搬送波電力を $C_n$ 、 $l$ 、もっとも大きな干渉を受けるリンクの干渉電力を $I_n$ 、 $l$ として式(5)(6)で表される。

$$\frac{C_{n,l}}{I_{n,l}} = \left\{ \sum_{i=1}^{ln/n-1} [li/2l + (-1)^i]^{-\alpha} \right\}^{-1} \equiv \xi \quad (5)$$

$$f_{n,l}(\gamma, p_b) = \frac{1}{l} f_1((1/\gamma n^\alpha + 1/\xi)^{-1}, p_b/n) \quad (6)$$

帯域利用率を最大にする $l$ は、ホップ数 $n$ によって求められる。この $l$ を用いた場合の帯域利用率を図4に示す。4ホップ以下の場合には、周波数再利用による帯域利用率に大きな変化は見られないため、図では周波数再利用を行う場合に帯域利用率は8ホップおよび16ホップのみ示している。この図より受信CINRが $-7$ dB以下、すなわち帯域利用率を最大にするホップ数が8以上となるような場合には、空間的な周波数再利用による帯域利用率の向上が可能である。

## 2.4 メッシュネットワークにおける空間的周波数利用効率

これまでの、伝送ビットレートが熱雑音に対する受信電力、あるいは「熱雑音とホップ間の干渉電力」に対する受信電力によって制限される場合について論じてきた。これにより、マルチホップ伝送は、各ホップにおける受信CINRをシングルホップ伝送時に比べて大きくできることが期待できる。本節では、マルチユーザ環境におけるマルチホップ伝送により空間的な周波数利用効率がどのように変化するかを求める。

QPSK伝送におけるシングルホップ伝送（空間的周波数利用効率 $\eta_{\text{QPSK}}$ 、帯域利用率 $T$ とする）に対し、周波数の再利用距離を $z$ として、帯域利用率を $T$ に保つものとした場

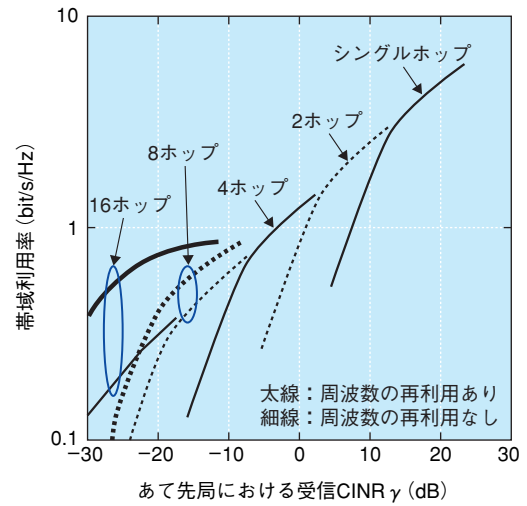


図4 周波数の空間的再利用による帯域利用率

合、式(7)となる。

$$f_n = (\gamma_{\text{QPSK}}/z^\alpha, p_b) = T \quad (7)$$

このため、マルチホップ時の空間的周波数利用効率は、式(8)で表すことができる。

$$\eta_s = \begin{cases} \frac{n^2 T}{2} \left( \frac{2}{nT} \frac{\beta_n}{\beta_1} \right)^{2/\alpha} \eta_{\text{QPSK}} & \frac{1}{2n} \leq T < \frac{2}{n} \\ \frac{n^2 T}{2} \left( \frac{3}{2^{nT}-1} \frac{\beta_n}{\beta_1} \right)^{2/\alpha} \eta_{\text{QPSK}} & \frac{2}{n} \leq T \leq \frac{6}{n} \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 $\beta_n = -1.5/\ln(5p_b/n)$

都市部における伝搬モデルとしてよく用いられる $\alpha=3.5$ としたときの特性を図5に示す。横軸は1ホップ当りの帯域利用率、縦軸は空間的周波数利用効率としている。すべてのホップ数の特性において極大点が見られるが、これは変

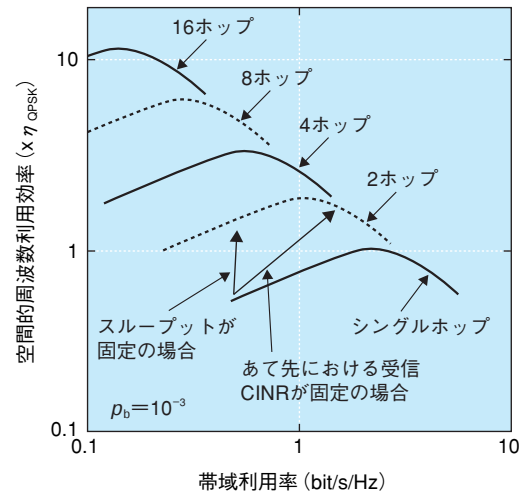


図5 マルチホップ伝送による空間的周波数利用効率の特性

調方式がQPSKの場合の特性である。図に示されるように、帯域利用率の低い領域（CINRの低い領域，すなわち周波数再利用距離の短い領域）では，マルチホップ伝送により空間的な周波数利用効率が10倍以上向上することが分かる。

### 3. あとがき

本研究では，適応レート制御を行う無線伝送において，マルチホップ伝送が帯域利用率および空間的な周波数利用効率に与える影響を数式を用いて解析したうえで，空間的な周波数利用効率の向上に大きく貢献することを示した。これは例えばセルラー方式におけるシステム容量を10倍以上に増大できる可能性があることを表している。今後は，この結果を活用するために，今回仮定した理想的なアクセス制御に対し，現実的なアクセス制御の影響を考慮した検討を進めていく。

#### 文 献

- [1] 中野 敬介，仙石 正和，篠田 庄司：“次世代アドホックネットワークの動向と課題—ユニバーサル・アドホックネットワークの提

案，” 信学技報，IN2000-7，Apr. 2000.

- [2] 向井 務，村田 英一，吉田 進：“マルチホップ自律分散無線ネットワークにおけるチャネル選択アルゴリズムと確立ルート数の検討，” 信学論 (B)，Vol. J85-B，No. 12，Dec. 2002.
- [3] A. J. Goldsmith and S. G. Chua: “Variable-rate variable-power MQAM for fading channels,” IEEE Trans. Commun., Vol. 45, No. 10, Oct. 1997.

#### 用 語 一 覧

64QAM：64 Quadrature Amplitude Modulation（64直交振幅変調）  
 BER：Bit Error Rate（ビット誤り率）  
 CINR：Carrier to Interference and Noise Ratio（キャリア信号対干渉雑音比）  
 QPSK：Quadrature Phase Shift Keying（4位相偏移変調）  
 SNR：Signal to Noise Ratio