

可変容量マイクロ波方式に関する検討

正 員 小牧 省三[†]

Theoretical Analyses of a Capacity Controlled Digital Microwave Radio

Shozo KOMAKI[†], Member

あらまし 本論文は、無線伝送方式に変調多値数を可変にする伝送容量制御を実施した場合の効果について理論解析を行ったものである。従来の無線伝送方式では、トラヒックの量にかかわらず、変調多値数を一定値に固定していた。このため、実際に伝送すべき信号がピーク状況にない場合においては、スクランブル信号等の無駄ビットを挿入し、本来必要な多値数以上の多値数にして伝送していた。このため、フェージング等の異常伝搬に対する抵抗力が低下し、回線瞬断が発生しやすくなっていた。しかし、トラヒックの変動と異常伝搬状況とは発生過程が独立であり、トラヒックピークと異常伝搬状況の同時発生確率は小さいため、発生したトラヒックに応じて伝送容量を制御することにより、従来よりも異常伝搬に強くできる。また、定常状況下においては、従来の設計値よりも大きな多値数を使用でき、トラヒックピークを吸収可能となる。本論文では、可変容量伝送制御方式を新しく提案し、疎通率向上に対する定量的解析を行った。この結果、1.5~3倍の効果が得られることが明らかになった。

1. ま え が き

従来の無線伝送路では、フェージング若しくは降雨等の厳しい異常伝搬条件下で最繁時トラヒックを誤りなく伝送可能なように多値数の選択を行い、常時一定の多値数のままで伝送を行っている。例えば、異常伝搬状況時に4 PSK 変調方式で設計した場合、16 QAM もしくは 256 QAM 信号が伝送可能な定常時においても、4 PSK 信号のままで伝送しており、逆に、4 PSK 信号のトラヒックに達していないような状況下では、2 PSK 信号若しくは、誤り制御等の手段を用いれば、瞬断を発生しないにもかかわらず、無駄パルスを挿入して4 PSK 信号のままで伝送を行い、瞬断を発生させている。

しかし、一般に、伝送すべきトラヒックには、変動があり、伝送路では、定常的に最大トラヒックの伝送を補償する必要はない。このため、伝送容量をトラヒックに応じて可変にした場合は、定常時には16 QAM 等の多値変調を用いて4 PSK 以上の伝送容量を確保でき、逆に信号断となるような厳しい異常伝搬時には、2 PSK または誤り制御等の手段を用いることにより、

最低限の伝送容量を確保することが可能である。

一般の公衆通信回線においては、トラヒック変動と異常伝搬状況は、独立過程であり、トラヒックピークの発生確率ならびに異常伝搬による瞬断の発生確率がともに小さく、それらが、同時に発生する確率が十分無視できる場合が多い。このため、可変伝送容量制御を実施することにより、トラヒックピーク吸収に大きな効果が期待できる。

無線伝送路を用いた伝送容量可変方式に対する従来の検討は、伝送速度を可変にする検討等^{(1)~(4)}に関するものが中心であり、変調多値数を可変にして伝送容量制御を行った場合の改善効果については、検討が行われていなかった。また、有線伝送路を使用した多値数可変伝送としては、MNP 伝送制御手順を用いた低速変復調器が実用されているが、上記に述べた異常伝搬状況を考慮したものでなく、効果が異なる。

本論文では、無線伝送路における変調多値数の可変伝送容量制御方式の基本構成、解析モデルを提示し、そのモデルに従い、伝送路瞬断による非疎通率とトラヒックピークの発生による非疎通率の両方を総合した疎通率の算出を行い、従来の固定容量伝送と比較し、疎通率改善効果が存在することを理論的に定量化する。

解析の条件として、本論文ではレイリーフェージング

[†] NTT 無線システム研究所, 横須賀市
NTT Radio Communication System Laboratories, Yokosuka-shi, 238-03 Japan

下における直交振幅変調 (2^n 値 QAM 変調), 位相変調 (M 値 PSK 変調) および, シヤノン限界式に従う可変伝送容量制御を対象とした.

2. 構成と解析モデル

(a) 構成 本解析に使用する可変伝送容量制御方式の構成を図1に示す. 加入者からの情報は, 交換機に入力され, 交換機では, 空き伝送路を選択する. ここで伝送路が満杯の場合は, 呼損が発生する. 従来の固定容量伝送路の構成では, 多値数を固定にしており, 総合の伝送路数は常時一定となる. また, 変調多値数の選択は, 異常伝搬状況下において, 情報を誤りなく伝送可能になるようにしているため, 異常伝搬時の耐力向上の必要があり, 次に述べる多値数可変とする場合と比べ多値数は小さく選定される. 従って, 伝送路数が少なく, 疎通率の低下は, 主として, 必要な伝送路数がないためによる呼損が主要因となる (図1(a)).

一方, 多値数可変伝送容量制御を実施した場合の構成図を図1(b)に示す. 交換機は, トラヒックの発生ごとに伝送路の片方から順々に伝送路に収容し, 伝送路においては, トラヒック量に応じて変調多値数が最小となるように選択する. また, 非フェージング状況下においては, 従来の固定伝送容量方式よりも大きな多値数選択を可能とするようにし, トラヒックに応じて

伝送路数を設定できる. このような構成にすることにより, トラヒックピーク発生時にも, 伝送路数が足りなくなることによる疎通率低下を防止できる. 更に, この制御を実施すると, トラヒックピーク時以外では, 多値数低減が可能になり, 異常伝搬に対する耐力が向上し, 回線の瞬断も低減できる. すなわち従来の固定容量伝送時に発生していた, 非トラックピーク時の異常伝搬による伝送路瞬断についても, 疎通率の改善が見込まれる.

(b) 解析モデル 本論文においては, 計算の簡易化のため, 伝送路で発生するフェージングは, レイリーフェージングとし, 瞬断の発生原因は, レベル低下であると仮定する. この仮定は, 帯域内振幅偏差が瞬断の主要因となる広帯域デジタル無線通信方式では, 必ずしも成立しないが, 近年開発が行われているマルチキャリア伝送等の狭帯域デジタル無線伝送方式においては近似的に成立する.

3. 理論検討

以下の節では, 伝送路瞬断によるトラヒック疎通率低下およびフェージングによる伝送路数 (多値数) 制限を考慮したトラヒック疎通率低下を算出し, これらの積から, 総合の疎通率を算出する. 後者を算出するためには, まず, フェージングによる伝送容量低下ならびに伝送容量とトラヒック疎通率の関係を明らかに

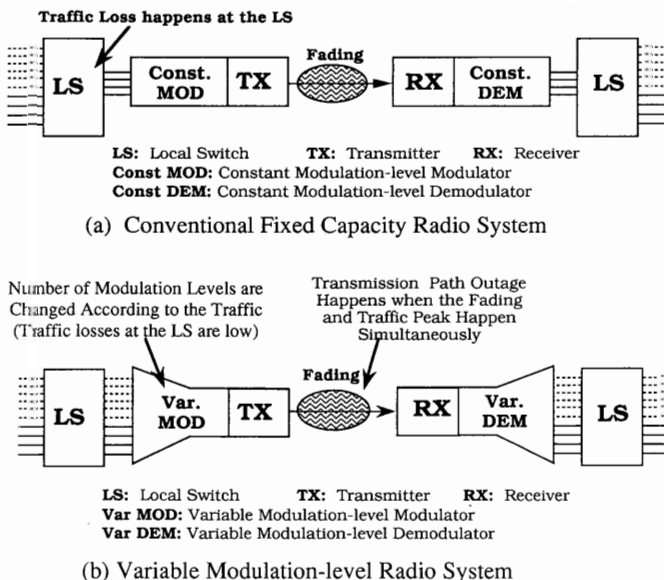


図1 固定容量伝送および可変容量伝送の構成
 Fig. 1 Configuration of variable transmission control.

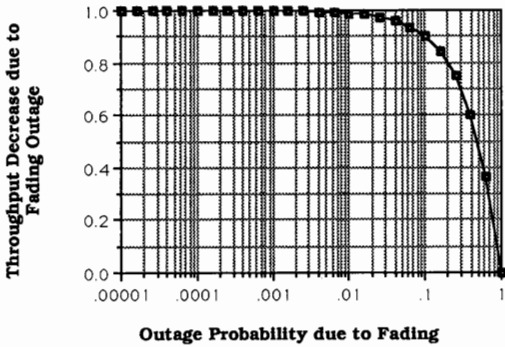


図 2 伝送路瞬断による疎通率低下

Fig. 2 Throughput degradation due to fading outage.

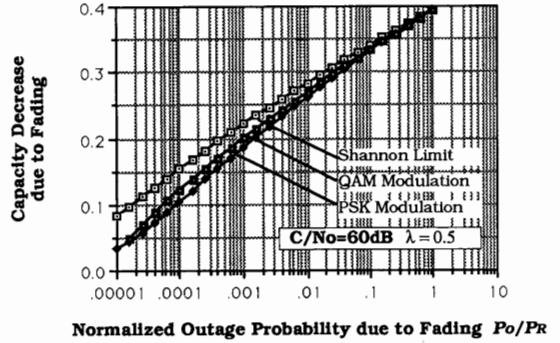


図 3 伝送容量低下係数

Fig. 3 Transmission capacity decrease due to fading.

し、これらより、フェージングによる伝送容量低下を考慮した疎通率低下を算出する。

総合疎通率については、フェージングによる伝送路瞬断率をパラメータとして具体例を計算し、総合疎通率を最大にする伝送路瞬断率が存在することを明らかにする。

3.1 伝送路瞬断による疎通率低下

伝送路瞬断率 P_0 とすると、伝送路瞬断による疎通率低下 P_{link} は次式となる。

$$P_{link} = 1 - P_0 \tag{1}$$

これを算出した結果を図 2 に示す。

3.2 フェージングによる容量低下を考慮した疎通率低下

(a) フェージング時の伝送容量低下 可変伝送容量制御を実施した場合は、伝送容量 (変調多値数) は、フェージングの深さに関して決まる。例えば、フェージングが浅い場合は、大きな多値数の変調信号が使用できるが、フェージングが深い場合には、多値数を小さくしないと符号誤りが大きくなる。フェージング時の伝送容量減少係数 K_t をフェージング時の伝送可能な容量 C_t と定常時の伝送可能な容量 C_0 の比と定義し、フェージングの深さすなわち伝送路瞬断 P_0 との関係を示すと以下のようになる (付録参照)。但し下記の式は、 $P_0/P_R < 10\%$ の領域でのみ近似的に成立する。

$$K_t = C_t / C_0 = \log_2(1 + P_0/P_R \cdot S/N_0) / \log_2(1 + S/N_0) \tag{2}$$

: Shannon の限界式

$$K_t = \log_2(1 + 3 \cdot P_0/P_R \cdot S/N_0 / S/N_{4psk}) / \log_2(1 + 3 \cdot S/N_0 / S/N_{4psk}) \tag{3}$$

: QAM 変調信号

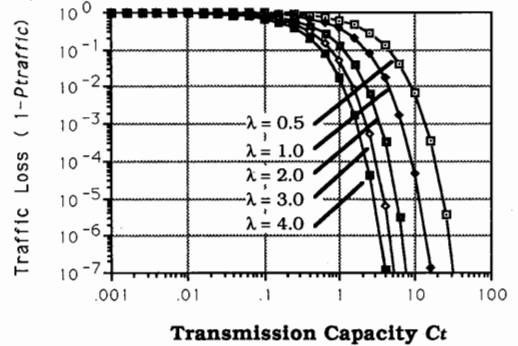


図 4 トラヒックピークによる呼損

Fig. 4 Traffic loss vs. transmission capacity.

$$K_t = \log_2(\pi / \sin^{-1} [S/N_{4psk} / 2 \cdot P_0/P_R \cdot S/N_0]) / \log_2(\pi / \sin^{-1} [S/N_{4psk} / 2 \cdot S/N_0]) \tag{4}$$

: PSK 変調信号

伝送容量減少係数とレイリーフェージング発生確率で正規化した伝送路瞬断率 P_0/P_R の関係の一例を図 3 に示す。

(b) 伝送容量とトラヒック疎通率 トラヒック量 C の確率密度が平均値 λ の指数分布に従うと仮定する⁽⁵⁾。

$$P = \lambda \exp(-\lambda \cdot C) \tag{5}$$

疎通率 $P_{Traffic}$ は、トラヒック量が規定の値 C_t 以下となる確率で規定でき、次式で与えられる。

$$P_{Traffic}(C_t) = \int_0^{C_t} \lambda \exp(-\lambda \cdot C) dC = 1 - \exp(-\lambda \cdot C_t) \tag{6}$$

なお、呼損率は、 $1 - \text{疎通率} = (1 - P_{Traffic})$ で定義できる。呼損率と伝送容量との関係の一例を図 4 に示す。

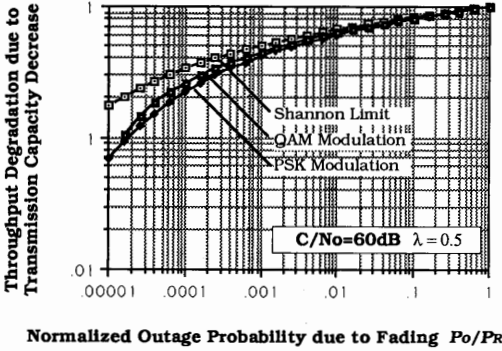


図 5 伝送容量低下による疎通率低下
Fig.5 Throughput degradation due to transmission capacity decrease.

(c) フェージングによる容量低下を考慮した疎通率低下

3.2(a)で算出したフェージング時の伝送容量低下係数 K_t を考慮した場合、3.2(b)に示したトラフィック変動による疎通率はフェージング時の容量低下に相当した分だけ低下する。定常時の容量を $C_t=1$ とし、これでフェージング時の容量を正規化して表示すると、この疎通率低下 $P_{Traffic}$ は、式(6)の容量 C_t が K_t に低下したことに相当するため、次式で与えられる。

$$P_{Traffic} = P_{loss}(C_t = K_t) = 1 - \exp(-\lambda K_t) \quad (7)$$

図5には、レイリーフェージング発生確率で正規化した伝送路瞬断率 P_0/P_R を X 軸にして計算結果の一例を示す。図より伝送路瞬断率 P_0/P_R を許容すれば、伝送容量が大きくなり、トラフィックピークに対する疎通率低下が防止できることがわかる。

3.3 総合トラフィック疎通率

3.2(c)で導出したフェージング時伝送容量による疎通率低下および3.1で算出した伝送路瞬断による疎通率低下の積より、両者を総合した疎通率 P_{total} が算出できる。

$$P_{total} = P_{Traffic} \times P_{link} = [1 - \exp(-\lambda K_t)] \times (1 - P_0) \quad (8)$$

以上の計算例をレイリーフェージング発生確率で正規化した伝送路瞬断率 P_0/P_R を X 軸にして図6に示す。図から明らかなように、伝送路瞬断率 P_0/P_R に対して疎通率の最適点が存在することがわかる。

4. 可変容量伝送の効果

(a) 容量制御を実施しない場合の疎通率 容量

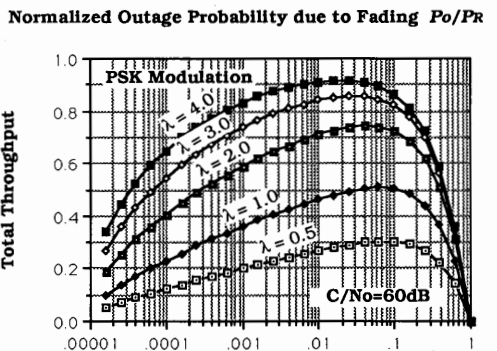
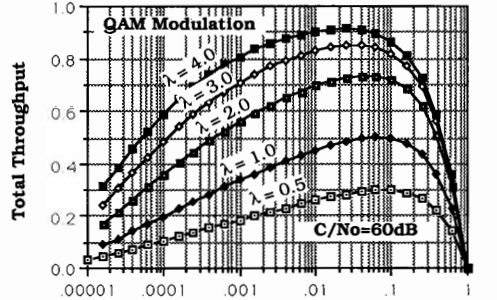
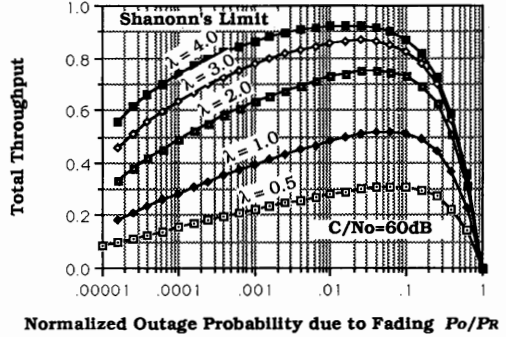


図 6 各種変調方式の総合疎通率
Fig.6 Total throughput for various modulation schemes.

制御を実施しない場合の疎通率は、レイリーフェージング発生確率で正規化した伝送路瞬断率設計値、 $P_0/P_R = 0.01\%$ 時の伝送容量から規定される総合疎通率で決定できる。すなわち、式で表現すると、

$$P_{total}(P_0/P_R = 0.01\%) = [1 - \exp\{-\lambda \cdot K_t(P_0/P_R = 0.01\%)\}] \times (1 - 0.01\%) \quad (9)$$

但し、 $P_0/P_R = 0.01\%$ は、CCIR 規定値 $P_0 = 0.05\%/2500$ km ($P_0 = 0.001\%/50$ km) および $P_R = 1\%$ (区間によって異なるので代表値) より定めた。

(b) 伝送容量制御時の効果 一方、伝送容量制

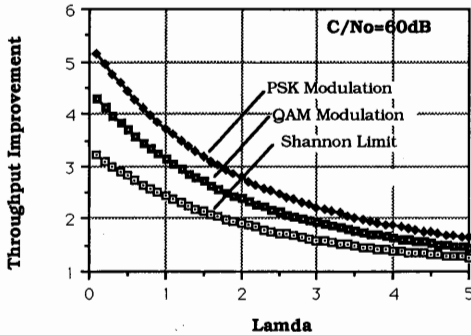


図 7 疎通率改善効果
Fig. 7 Throughput improvement.

御時の疎通率改善は、次式で定義できる。

$$I = \text{Max} (P_{\text{total}}) / P_{\text{total}} \quad (P_0/P_R = 0.01\%)$$

図 7 は、疎通率改善効果の一例をトラヒックピークの係数 λ を X 軸にして示す。検討結果では、 $\lambda=2\sim3$ の場合で、疎通率改善効果が 1.5~3 倍程度得られることがわかる。

5. むすび

本論文においては、無線伝送方式に変調信号の多値数を可変にする可変伝送容量制御を実施した場合の疎通率改善効果について理論的解析を行った。本検討では、フェージング条件としてレイリーフェージング、多値数可変の変調信号として、 2^{2n} 値 QAM、M 値 PSK、シャノンの限界式を対象とした。本検討結果によると、可変伝送容量制御により、疎通率が 2~3 倍程度に改善できることが判明した。今後、他の容量可変技術、例えば、降雨減衰領域とフェージング領域の共用、ルートダイバシチ利用、誤り制御技術の利用、同一周波数の送受共用、帯域可変復調器の利用等の効果ならびに最近の ATM 伝送モードへの適用効果についても検討する必要がある。

謝辞 本検討を進めるにあたり、御指導・御助言頂いた無線システム研究所小松山無線伝送技術研究部長ならびに無線中継関連の研究者に深謝致します。

文 献

- (1) B. S. Katakol and S. L. Maskara: "Adaptive variable-rate communication system for fading channels", J. INSTN. Electronics & Telecom. Engrs., **32**, 3 (1986).
- (2) L. B. Milstein, D. L. Schilling, et al.: "A performance of meteor-burst communication channels", IEEE J. Sel. Areas Commun., **5**, 2 (Feb. 1989).
- (3) S. L. Chang: "A feedback adaptive variable rate meteor burst communication system", Conference

Record of the IEEE ICC'89, pp. 14. 2.1 (1989).

- (4) 六浦光一, 岡田博美: "パケット無線ネットワークのローカル/グローバル網構成", 信学論(B), **J71-B**, 9 pp. 1010-1019 (昭 63-09).
- (5) 電子情報通信学会編: "電子通信工学ハンドブックトラヒック理論", pp. 322-331 (昭 54).

付 録

伝送路容量と伝送路瞬断率の関係

(a) 多値変調と所要 C/N

単位周波数当りの伝送容量の上限は一般にシャノン限界としてよく知られており、以下の式で与えることができる。

$$\eta_{UL} = C/W = \log_2 (1 + S/N) \quad (\text{A}\cdot\text{1})$$

ここで、 η は周波数利用効率、 C は伝送容量、 W は帯域幅、 S/N は、信号対雑音比である。

また、各種の多値変調の周波数利用効率 η は、以下のように求められる。

まず、各種の多値変調の所要の信号対雑音比 S/N は、信号点間隔一定時の平均信号電力で規定でき、 $S/N_{\text{QAM}} = 1/3 \cdot (2^{2n} - 1) \cdot S/N_{4\text{psk}}$: 2^{2n} QAM 変調

$$(\text{A}\cdot\text{2})$$

$$S/N_{\text{psk}} = 1/2 \cdot 1/(\sin(\pi/M)) \cdot S/N_{4\text{psk}}$$

$$: M \text{ 値 PSK 変調 } (\text{A}\cdot\text{3})$$

ここで、 $S/N_{4\text{psk}}$ は 4 PSK 変調における所要 S/N であり、例えば、符号誤り率 10^{-4} においては $S/N_{4\text{psk}} = 13.8$ dB、 M は信号多値数、 $2n$ は伝送ビット数であり、 $2n = (1/2) \log_2 M$ である。

また、伝送容量 C は、符号間隔 T および変調の多値数 M を用いて

$$C = 1/T \cdot \log_2 M \quad (\text{A}\cdot\text{4})$$

占有帯域幅 W は、ロールオフ率 α を用いて

$$W = (1 + \alpha) \cdot (1/T) \quad (\text{A}\cdot\text{5})$$

従って、式(A.4)、(A.5)より、周波数利用効率 η は、

$$\eta = C/W = \log_2 M / (1 + \alpha) \quad (\text{A}\cdot\text{6})$$

そのときの所要 S/N は、式(A.2)、(A.3)である。

(b) 所要 C/N と伝送路瞬断率の関係

レイリーフェージング発生時の受信信号の減衰量 X とその減衰量を超える確率(瞬断率) P_0 は、 $X < 0.1$ すなわち、 P_0/P_R が 10% 以下の場合、次式で近似できる。

$$P_0 = P_R \cdot X \quad (\text{A}\cdot\text{7})$$

但し、

$$P_R: \text{レイリーフェージング発生確率}$$

である。

瞬断時の信号対雑音電力比 S/N は、定常時の信号対雑音電力比 S/N_0 から、この減衰量 X だけ劣化したものなので、瞬断率 P_0 とすると、瞬断時の信号対雑音電力比 S/N は

$$S/N = S/N_0 \cdot X = P_0/P_R \cdot S/N_0 \quad (\text{A}\cdot 8)$$

但し、 S/N_0 は、定常時の受信信号対雑音電力比であり、送信電力ならびに受信雑音指数等で定まる係数である。

(c) フェージングによる伝送容量減少と伝送路瞬断率

定常時の伝送容量 C_0 ならびにフェージングによる瞬断限界時の伝送容量 C_t は、Shannon の伝送容量上限値に対して、式(A・1)、(A・8)より

$$C_0 = W \log_2 (1 + S/N_0) \quad (\text{A}\cdot 9)$$

$$C_f = W \log_2 (1 + P_0/P_R \cdot S/N_0) \quad (\text{A}\cdot 10)$$

従って、フェージング時の伝送容量減少係数 K_t と伝送路瞬断による呼損率 P_0 の関係は、

$$\begin{aligned} K_t &= C_f/C_0 \\ &= \log_2 (1 + P_0/P_R \cdot S/N_0) / \log_2 (1 + S/N_0) \\ &\quad : \text{Shannon の限界式} \quad (\text{A}\cdot 11) \end{aligned}$$

QAM 変調信号に対しても同様に、定常時の伝送容量 C_0 は、式(A・2)より

$$\begin{aligned} C_0 &= \{W/(1+a)\} \cdot 2n \\ &= \{W/(1+a)\} \cdot \log_2 (1 + 3 \cdot S/N_0/S/N_{4\text{psk}}) \quad (\text{A}\cdot 12) \end{aligned}$$

フェージングによる瞬断限界時の伝送容量 C_t は、式(A・2)より

$$C_f = \{W/(1+a)\} \cdot \log_2 (1 + 3 \cdot P_0/P_R \cdot S/N_0/S/N_{4\text{psk}}) \quad (\text{A}\cdot 13)$$

従って、フェージング時の伝送容量減少係数 K_t は

$$\begin{aligned} K_t &= C_f/C_0 \\ &= \log_2 (1 + 3P_0/P_R \cdot S/N_0/S/N_{4\text{psk}}) \\ &\quad / \log_2 (1 + 3S/N_0/S/N_{4\text{psk}}) \\ &\quad : \text{QAM 変調信号} \quad (\text{A}\cdot 14) \end{aligned}$$

同様に、PSK 変調波に関しては、式(A・3)より

$$\begin{aligned} C_0 &= \{W/(1+a)\} \cdot \log_2 M \\ &= \{W/(1+a)\} \cdot \log_2 (\pi / \sin^{-1} [S/N_{4\text{psk}}/2 \cdot S/N_0]) \quad (\text{A}\cdot 15) \end{aligned}$$

$$C_f = \{W/(1+a)\} \cdot \log_2 (\pi / \sin^{-1} [S/N_{4\text{psk}}/2 \cdot P_0/P_R \cdot S/N_0])$$

$$\begin{aligned} K_t &= \log_2 (\pi / \sin^{-1} [S/N_{4\text{psk}}/2 \cdot P_0/P_R \cdot S/N_0]) \\ &\quad / \log_2 (\pi / \sin^{-1} [S/N_{4\text{psk}}/2 \cdot S/N_0]) \\ &\quad : \text{PSK 変調信号} \quad (\text{A}\cdot 17) \end{aligned}$$

(平成2年1月4日受付, 6月4日再受付)



小牧 省三

昭45阪大・工・通信卒。昭47同大学院修士課程了。同年電電公社電気通信研究所(現、日本電信電話株式会社)入社。以来、デジタル無線中継伝送技術の研究開発に従事。現在、NTT無線システム研究所無線伝送技術研究部主幹研究員。工博。昭

50年度本学会論文賞受賞。IEEE 会員。