

非線形増幅を伴う伝送系における 多シンボル遅延検波の誤り率特性

片瀬 泰幸, 三輪 昌也, 半田 志郎, 大下 眞二郎

信州大学工学部

〒380-8553 長野市若里 4-17-1

TEL:026-269-5252/E-mail:{katase,masaya,handa,oshita}@oshan.shinshu-u.ac.jp

あらまし デジタル無線通信において、効率のよい電力増幅を考えた場合、増幅器の非線形領域までも利用することになる。その時、AM-AM、AM-PM歪みにより符号誤り率は劣化する。本稿では、振幅位相変調方式について、非線形増幅器が用いられた場合のスペクトルの拡大、符号間干渉、符号誤り率について考察している。白色ガウス雑音通信路およびフェージング通信路に対して、多シンボル遅延検波および同期検波が用いられた場合のスターQAMの符号誤り率を検討し、多シンボル遅延検波の方が、同期検波よりも良好な誤り率特性が得られることを確認した。

キーワード 多シンボル遅延検波, 16APSK, MAP 基準, 非線形増幅

Multiple-Symbol Differential Detection on transmission channels with Non-Linear Amplification

Yasuyuki KATASE, Masaya MIWA, Shiro HANDA and Shinjiro OSHITA

Faculty of Engineering, Shinshu University

Wakasato 4-17-1, Nagano-city, Nagano 380-8553, Japan

TEL:+81-26-269-5252/E-mail:{katase,masaya,handa,oshita}@oshan.shinshu-u.ac.jp

Abstract In case of digital radio communication, the amplification which uses electric power efficiently utilizes even the non-linear area of the amplifier. Then, SER(Symbol Error Rate) performance degrades with distortion of AM-AM and AM-PM. In this paper, the spectral expansion, inter-symbol interference and SER of APSK are considered in the case where non-linear amplification is used. Also, SERs of multiple-symbol differential detection and coherent detection are examined over an AWGN channel and a Rayleigh-fading channel. As a result, it is confirmed that SER performance of multiple-symbol differential detection is superior to that of coherent detection, when these detection schemes are applied to a typical constellation of 16APSK, the star QAM.

key words multiple-symbol differential detection, 16APSK, MAP criterion, non-linear amplification

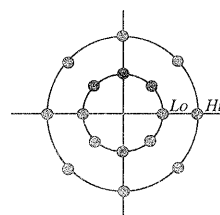
1. まえがき

近年、携帯電話の需要拡大に伴い、通信システムには、情報伝送の大容量高速化、および、周波数利用効率の向上という観点から、高密度化、狭帯域化が重要な課題となっている。これらの課題の解決策として、MASK(Multiple Amplitude Shift Keying)や MPSK (Multiple Phase Shift Keying), また、APSK(Amplitude Phase Shift Keying)による高密度化、狭帯域化が不可欠となるが、より高精度の受信形態が求められる。

MAP(Maximum A Posteriori probability)基準[1]に基づく多シンボル遅延検波方式 [2]-[8] は、AWGN(Additional White Gaussian Noise)伝送路における最適な推定方式として知られている。この方式は、送信信号系列の事後確率を最大とする信号系列を推定することで、符号誤り率(SER : Symbol Error Rate)を最小にする。多シンボル遅延検波は、同期検波のような基準搬送波の再生が不要であり、かつ受信特性は遅延検波方式よりも優れ、観測シンボル数を増加させることで差動符号化同期検波の特性に近づくという特長を持つ。加えて、緩慢なレイリーフェージング伝送路においても良好な特性が得られる。近年では、この方式を MPSK(Multiple Phase Shift Keying)に適用するための判定評価式の導出 [2] や、MAPSK(Multiple Amplitude Phase Shift Keying)への適用が検討されている[3]-[8]。

変調波の包絡線が一定の MSK 系列の場合には、C 級増幅器に代表される非線形増幅器を用いることにより、電力効率の高いシステムを実現することが可能であるが、PSK や QAM 系列のような周波数利用効率の高い線形変調方式では、振幅成分を歪ませないように線形増幅器を使う必要がある。その場合、増幅器の電力効率を向上させるため、できるだけ飽和点に近い動作点を設定(これを、出力バックオフの小さい点で動作させるという)することが望ましいが、出力バックオフの小さい領域では、入力振幅/出力振幅(AM/AM)や入力振幅/出力位相(AM/PM)非線形が存在し、包絡線振幅変動の大きな信号を入力すると、これらの非線形歪みによってスペクトルが広がるとともに伝送特性が劣化する[9]。

本報告では、非線形増幅を伴う伝送系において 16APSK の多シンボル遅延検波適用時の符号誤り率



the star QAM

図 1 : 信号点配置

特性について検討している。なお本報告では、16APSK として Star QAM(Quadrature Amplitude Modulation)[8] について検討する(図 1 参照)。また、送・受信フィルタの伝送特性として、それぞれルートロールオフ($\alpha=0.5$)特性を仮定し、非線形増幅による伝送特性を調べる。2. では、MAP 基準に基づく MAPSK の多シンボル遅延検波とその判定評価式について述べる。3. では、非線形増幅によるスペクトル拡大、符号間干渉について述べた後、最適リング比について検討する。4. では、加法的白色ガウス雑音(AWGN)伝送路での同期検波方式との比較を通して、多シンボル遅延検波方式の特徴を考察し、さらにレイリーフェージング伝送路における特性を同期検波、多シンボル遅延検波、および遅延検波について比較、検討する。

2. 多シンボル遅延検波

2.1 MAPSK の判定基準

各送信シンボルの発生確率がすべて同じ場合、MAP 基準は ML(Maximum Likelihood)基準と等価となる。したがって MAP 基準の判定評価式は、受信信号系列の対数尤度関数により与えられる。AWGN 伝送路において、離散時間 k における複素送信信号を s_k とすると、複素受信信号は $r_k = s_k e^{j\psi} + n_k$ となる。ここで n_k は、平均値が 0、分散が σ_n^2 の複素ガウス雑音の標本値である。また、 ψ は伝送路に依存した不定位相であり、 $(-\pi, \pi)$ で一様分布すると仮定する。

多シンボル遅延検波において観測シンボル数を N とすると、 $r = (r_{k-N+1}, \dots, r_k)$ の尤度関数は次式で与えられる。

$$p(r | s, \psi) = \frac{1}{(2\pi\sigma_n^2)^N} \exp\left(-\frac{\|r - se^{j\psi}\|^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (1)$$

多シンボル遅延検波では、 N 個の受信信号を1つのブロックとして扱い、 r_{k-N+1} を基準信号として、その他の信号 $\{r_{k-i}\}$ を正規化して、 $N-1$ 次元の条件付確率に基づいて送信信号系列を推定する。よって MAPSK の尤度関数は、式(1)において ψ を $(-\pi, \pi)$ で平均化し、さらに基準信号 r_{k-N+1} の振幅及び位相について平均化し、さらに無関係の項を省くことによって次式のように求められる。

$$m = \frac{\left| \sum_{i=0}^{N-1} r_{k-i} s_{k-i}^* \right|^2}{\sum_{i=0}^{N-1} |r_{k-i}|^2} - \sum_{i=0}^{N-1} |s_{k-i}|^2 + 2\sigma_n^2(N-1) \ln \left\| \sum_{i=0}^{N-1} r_{k-i} s_{k-i}^* \right\| \quad (2)$$

式の右辺第2項までは、文献[3]で求められた評価式 ($=m_{\text{approx}}$) と同一であり、伝送路の SN 比には無関係である。しかしながら、より厳密な評価式 m には、第3項に示すように伝送路の雑音の電力に依存した項が付加される。

一方、判定基準は評価式 m を用いて次のように表現できる。

Choose the sequence $\{s_k\}$ if m is maximum

3. 非線形増幅

3.1 非線形増幅器による信号の歪み

移動通信のために、高い電力効率と低歪み特性を兼ね備えた電力増幅器の開発が盛んに行われている。本報告では、一例として 1.9GHz 帯 GaAsFET 増幅器の入出力特性[9](図2参照)を仮定してシミュレーションを行う。動作点は飽和出力からのバックオフとして定義している。図3に非線形歪みによって広がった電力スペクトルを示す。ここから分かるように、動作点がより非線形領域に近づく(バックオフが小さい)につれて、スペクトルの拡大率も大きくなっている。スペクトルの拡大は、非線形素子の平均動作点を中心とする入力信号のダイナミックレンジに依存する。非線形特性から、特にピークファクタ(最大電力/平均電力)がスペクトルを拡大させる主要因となっていると考えられる。

図4に、スターQAMの非線形増幅を行った後の復調アイパターン、および信号空間ダイアグラムを示す。バックオフ 10dBでは、符号間干渉はほぼ

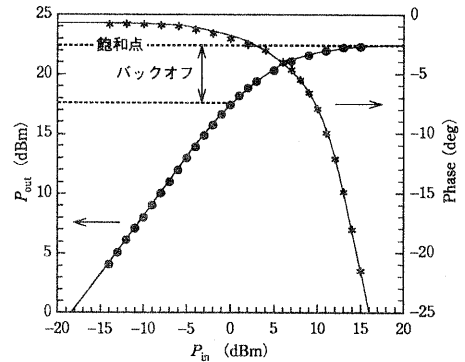


図2 GaAsFET 増幅器の入出力特性

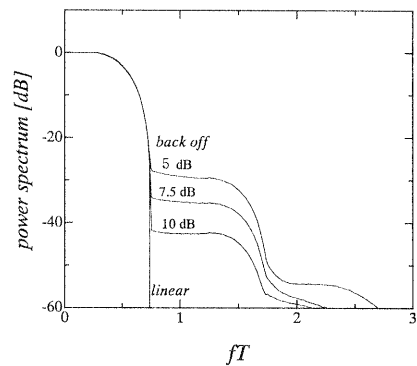


図3 非線型歪みによる送信スペクトル特性

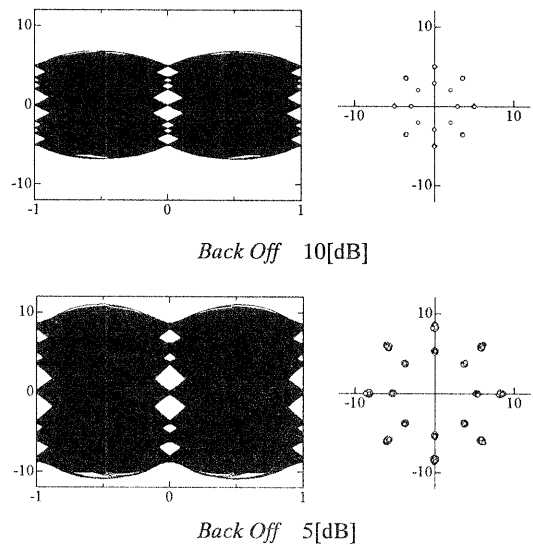


図4 star QAM の非線形増幅後の復調アイパターン及び信号空間ダイアグラム

ないに等しいが、5dB になると大きな符号間干渉が発生している。また、信号空間ダイアグラムにおいてもばらつきが大きくなっている。

3.2 最適リング比

非線形増幅を行うと、バックオフの値が小さいほど増幅器の非線形領域を多く使用することになる。この領域では、信号電力の大きいものほど、その増幅度は小さくなってしまふ。これは受信信号のリング比に変化を与えることを意味している。図 5 にリング比を変化させた時のそれぞれのバックオフについての SER 特性を示す。リング比とは、外円の振幅に対する内円の振幅のことであり、ここでは送信フィルタへの入力リング比のことをさしている。非線形増幅では、入力側のリング比と、出力側のリング比が異なるので、誤解を避けるために、ここでは、入力リング比に統一する。また、受信側では送信側の動作点における増幅度のみわかっているものとする。さらに、受信側のレプリカは送信信号を非線形増幅器の動作点における増幅度で線形増幅したものを使用している。すなわち、レプリカのリング比は、送信信号のリング比と同じである。

同図より、同期検波においては、バックオフが小さい領域ほど SER が最小となるリング比は小さくなり、バックオフが大きい領域ほど線形増幅時の最適なリング比に近くなっているのが分かる。これは、バックオフが小さい領域ほど内円の増幅度は外円の増幅度に比べると大きくなるので、非線形増幅後のリング比は、増幅する前よりも大きくなる。したがって、送信側においてあらかじめリング比を小さく設定して送ることによって、受信信号のリング比は線形増幅時の最適な値に近くなり、特性は改善される。バックオフが小さくなるほどリング比の変化量も大きくなるので、その分送信側でリング比を小さく設定することにより最適になると考えられる。また逆に、バックオフの値が大きくなるほど、それは線形増幅に近くなる事を意味するので、最適リング比も線形増幅時の最適な値に近くなる。

これに対して、多シンボル遅延検波は、バックオフが小さくなくても、同期検波ほどは最適リング比の変動は大きくない。これは、多シンボル遅延検波が、系列を一度に観測して検波するので、多少信号のリング比が変動したとしても、その影響

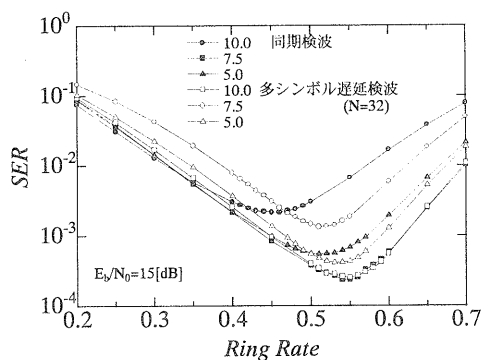


図 5 送信リング比の変動に伴う誤り率の変化

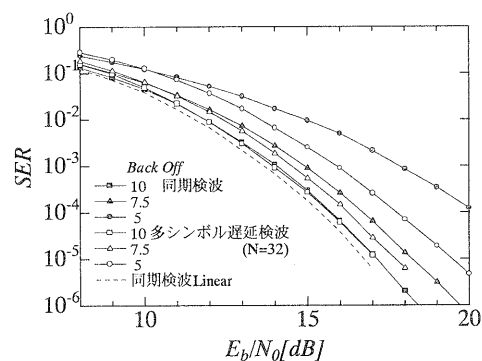


図 6 同期検波と多シンボル遅延検波の SER 特性の比較

を受け難いからであると考えられる。

4. 多シンボル遅延検波と同期検波の比較

4.1 AWGN 伝送路

図 6 にスター-QAM の AWGN 伝送路における多シンボル遅延検波及び同期検波時の SER 特性を示す。なお、リング比はすべてスター-QAM 同期検波の最適リング比である 0.566 を用いている。

同図から、 E_b/N_0 の非常に小さいところでは、多シンボル遅延検波よりも同期検波のほうが SER 特性がよくなっているが、 E_b/N_0 が大きくなるにつれて多シンボル遅延検波の方が良好な SER 特性を得ている。バックオフを 10dB とすると、非線形増幅を用いない場合と比べ約 0.5dB の劣化にとどまっている。

ここで、同期検波の劣化について考察する。同期検波は送信信号のレプリカからの距離が最小と

なる点を受信点と判定するので、正確なレプリカを必要とする。しかし、受信器においては送信器の非線形増幅器の特性をすべて知ることができないため、受信側で正確なレプリカを作ることができない。すなわち、正確な検波ができないことになる。 E_b/N_0 の小さいところではこの影響も小さいが、 E_b/N_0 が大きくなると、符号間干渉も大きく影響し、バックオフの値が小さいほど特性は劣化すると考えられる。

これに対して、多シンボル遅延検波には同期検波ほど大きな劣化は見られない。これも前節で述べたように、多シンボル遅延検波は受信信号系列を一度に観測し検波するため、最適なレプリカでなくてもある程度正確に検波できるからであると考えられる。さらに、系列を見ることによって、符号間干渉の影響も、同期検波ほど大きくは受けないと思われる。

4.2 レイリーフェージング伝送路

図 7, 8 にスター-QAM のレイリーフェージング伝送路における、SER 特性の比較を示す。ここでは、 $F_d T_s$ が 0.001 と、0.0001 について検討している。また、同期検波では、理想的な AGC(Auto Gain Control)を行っており、振幅に関してはフェージングを受けていない。さらに、理想的な PLL(Phase Locked Loop)(フェージングの位相が既知としている)および、8 乗則を用いた PLL(10 シンボル分の平均)を用いて、フェージングの位相を検出している。

図 7 から、 $F_d T_s=0.001$ の時には、 E_b/N_0 が大きくなると、多シンボル遅延検波は同期検波、および、遅延検波よりも特性は劣化する。しかし、 E_b/N_0 が 20dB 以下の領域においては、理想同期検波には劣るものの、遅延検波よりは、良好な特性を得ている。これは、多シンボル遅延検波が、遅延検波に比べガウス雑音に対しては強いので、ガウス雑音の大きな領域においては、遅延検波よりもよい特性を得る事ができるものと考えられる。

さらに、図 8 より $F_d T_s=0.0001$ においては、多シンボル遅延検波は E_b/N_0 が大きくなった時に多少遅延検波よりも劣化するものの、35dB 以下では同等以上の特性を得ている。また、同期検波との比較においては、完全に理想的な同期検波には劣るものの、PLL を用いた同期検波よりも良い特性を得ている。同期検波で PLL を用いる場合、フェージングによる位相変動に追従できなくなり、エラー

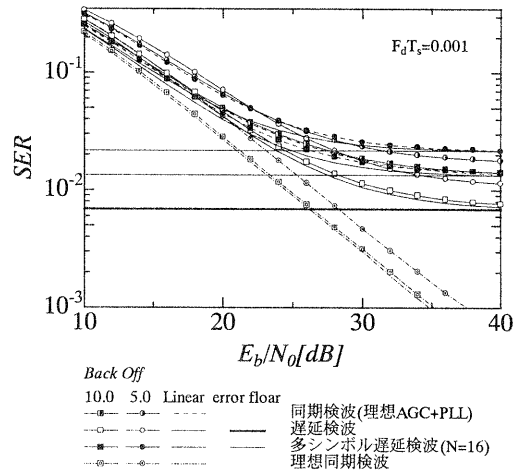


図 7 $F_d T_s=0.001$ 時の SER 特性の比較

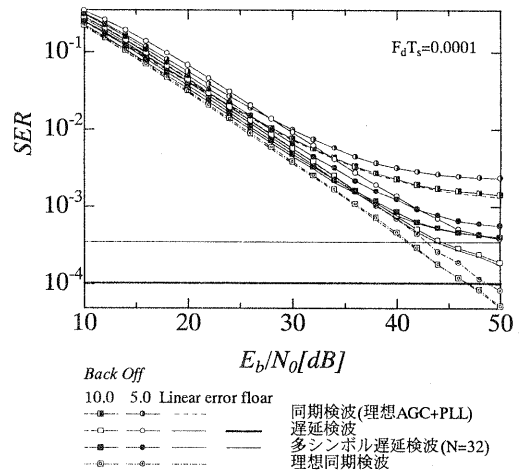


図 8 $F_d T_s=0.0001$ 時の SER 特性の比較

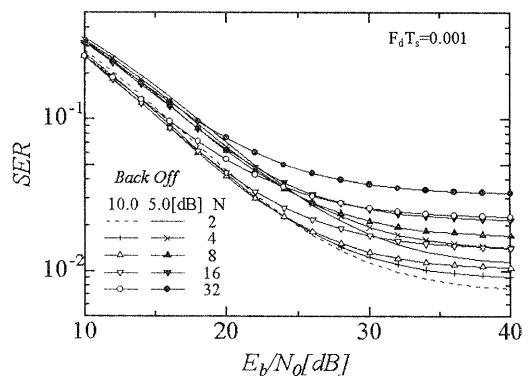


図 9 観測シンボル数 N による SER 特性の変化

フロアも出ている。多シンボル遅延検波は、フェージングが遅くなれば系列内での振幅変動はなくなり、AWGN 伝送路の特性に近づくので、その特性は改善され、PLL を用いた同期検波よりも良好な SER 特性が得られ、さらに、理想同期検波の特性に近づくと考えられる。

また、多シンボル遅延検波は観測シンボル数 N を小さくすることにより、遅延検波の SER 特性に近づけることができる。図 9 に、バックオフが 10[dB] および 5[dB]、 $F_d T_s = 0.001$ の時に、観測シンボル数 N を変化させた場合の多シンボル遅延検波の SER 特性の変化を示す。 $N=2$ というのは、一つ前の信号のみを見ることによって信号点を決定するということであり、遅延検波のことである。これより、非線形歪みおよび比較的早いフェージングがあっても観測シンボル数を小さくすることによって遅延検波の SER 特性に近づくことが分かる。 N が大きい場合にエラーフロアが早めに現れるのは、評価式においてブロック内では振幅の変動が考慮されていないためである。

5. むすび

本報告では、スター-QAM に非線形増幅を行った場合の非線形歪みの影響と、AWGN 伝送路における同期検波および多シンボル遅延検波方式の非線形歪みによる SER 特性の劣化について検討した。さらに、レイリーフェージング伝送路における同期検波と、多シンボル遅延検波、遅延検波の SER 特性の比較を行った。その結果、バックオフを小さくすると、同期検波の最適リング比は、線形増幅同期検波の最適リング比よりも小さくなり、バックオフを大きくすることによって、最適リング比は線形増幅同期検波の最適リング比に近づくことを確認した。また、多シンボル遅延検波の最適リング比についても同様のことが言えるが、同期検波ほど、その影響は大きくないことが明らかとなった。次いで、AWGN 伝送路における多シンボル遅延検波と同期検波の SER 特性の比較については、 E_b/N_0 の大きい領域において、同期検波よりも多シンボル遅延検波の方が SER 特性の劣化が小さいことを確認した。さらに、レイリーフェージング伝送路における多シンボル遅延検波、同期検波、および遅延検波の SER 特性の比較については、多シンボル遅延検波は、理想同期検波に比べると、

特性は劣化するものの、 E_b/N_0 の小さい領域に関しては、理想同期検波の特性に近づく。また、 E_b/N_0 の小さい領域では、多シンボル遅延検波は遅延検波よりも良好な SER 特性が得られる事を確認した。さらに、遅いフェージングに関しては、多シンボル遅延検波は、PLL を用いた同期検波よりも良好な特性を示し、 E_b/N_0 が非常に大きい領域を除いて、理想同期検波の特性に近づき、遅延検波の特性よりも良好な SER 特性が得られる事を確認した。そして、多シンボル遅延検波において、非線形歪みおよび早いフェージングのある場合においても観測シンボル数を少なくすることによって、より遅延検波の特性に近づけることが可能であることを確認した。

今後の課題としては、チャンネル推定器や、判定帰還リング比推定器などにより、どの程度非線形増幅の影響を取り除くことが可能かの検討が残されている。

参考文献

- [1] J.G.Proakis: Digital Communications 3rd Ed., McGraw-Hill, NY, pp654-655, 1995
- [2] D.Divsalar and M.K.Simon: "Multiple-symbol differential of MPSK," IEEE Trans. Commun., vol.COM-38, No.3 pp.300-308 (March 1990)
- [3] 鈴木利則,水野俊夫,"差動符号化振幅変調信号の多シンボル遅延検波方式とその 16DAPSK への適用," 信学論 (B- II), vol.J77-B- II, No.12, pp739-748 (Dec.1994)
- [4] M.Machida, S.Handa and S.Oshita: "Multiple-Symbol Differential Detection of APSK Based on MAP Criterion," Proc. IEEE GLOBECOM 98 Conf., Sydney, vol.5, pp.2740-2744 (Nov 1998)
- [5] M.Machida, Y.Kaneko, S.Handa and S.Oshita, "Multiple-Symbol Differential Detection of APSK and Limited Search Scheme using M-Algorithm," Proc.ISPACS 98 Conf., Melbourne, vol.1, pp.128-132 (Nov 1998)
- [6] 町田正信,半田志郎,大下眞二郎,"16 値振幅位相変調方式における(4,12)型同心円信号点配置とその受信特性," 信学論(B- II) vol.J80-B- II, No.10, pp.815-822 (1997-10)
- [7] M.Miwa, M.Machida, S.Handa and S.Oshita: "Multiple-Symbol Differential Detection of APSK using (M,L)Algorithm," ITC-CSCC'99, Vol.1, pp.623-626, Jul.1999
- [8] 根本浩二,笹瀬巖,"ビタビアルゴリズムを用いた 16DAPSK 遅延検波方式," 電気情報通信学会論文誌 B- II, Vol.J77-B- II, No.12, pp749-755, Dec.1994
- [9] 斎藤:"デジタル無線通信の変復調", 電子情報通信学会編