

DS-CDMA における GMSK 変調方式の性能に関する一検討

荒井 宣人 デービッド アサノ

〒 380-8553 長野市若里 4-17-1
信州大学 工学部 情報工学科

あらまし 本稿では広帯域信号に短い拡散符号系列をかけたものと狭帯域信号に長い拡散符号系列をかけたものとのトレードオフについて考察する。DS-CDMA において、長い拡散系列を用いた方が良い性能を示すのではないかと予測し、変調方式にはより狭帯域な GMSK(Gaussian filtered Minimum Shift Keying) と広帯域信号の PSK(Phase Shift Keying) を用い、「スペクトル拡散後の帯域幅を等しくする」という条件のもと、計算機シミュレーションの波形解析により両者の性能を比較する。結果として、より大きい処理利得を用いることで、GMSK が PSK よりも性能が良く、有効性を示した。

キーワード CDMA, GMSK, PSK, 処理利得, 帯域幅, ビット誤り率

Performance Evaluation of GMSK and PSK in DS-CDMA Systems

Nobuto ARAI David ASANO

Department of Information Engineering
Shinshu University
4-17-1 Wakasato, Nagano, 380-8553 Japan

Abstract In this paper, the tradeoff between systems using a wideband signal and a short spreading code and systems using a narrowband signal and a long spreading code is examined. We expect that using a long code with a narrowband signal will result in better overall performance. The performance of GMSK (Gaussian filtered Minimum Shift Keying), which has a narrow modulation bandwidth, and PSK (Phase Shift Keying), which has a wide modulation bandwidth, is compared by waveform analysis using computer simulations under the condition that the bandwidth after spreading is the same. Results show that using GMSK results in better performance than PSK because a longer spreading code can be used. Therefore using GMSK is effective for DS-CDMA systems.

Keywords CDMA, GMSK, PSK, processing gain, bandwidth, bit error rate

1 はじめに

現在、移動体通信において代表的な通信方式となった CDMA(Code Division Multiple Access) を用いたセルラ移動電話のサービスが開始されて以来、(99 年に IDO と DDI セルラーが発売した cdmaOne を皮切りに、最近では試験営業を行い、まもなくサービス開始となる NTT ドコモの FOMA などが注目されている) ますますモバイルマルチメディア社会の確立が進み、もはや音声だけでなく、静止画像、動画像などのデータ通信が主流となり、伝送を行うデータ量が膨大になることから、今までよりも高速、かつ高品質なシステムが必要となる。

本研究室では、DS-CDMA において既存のシステムよりも狭帯域なデジタル変調方式を用いて、拡散率を上げる方が優れた性能を示すのではないかと予測し、現在日本のセルラ移動電話の通信方式で使用されている QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) などの位相変調 (PSK) と、CPM(Continuous Phase Modulation) を DS-CDMA に用いた性能比較が行われてきた。[2]

そこで本稿では、欧州の通信システムである GSM で採用され、CPM の一種である GMSK(Gaussian filtered Minimum shift keying) について取り上げ、この GMSK を DS-CDMA に用いたシステムの性能を検討していく。

DS-CDMA の性能を検討するにあたり、拡散系列符号、ユーザ数をパラメータとし、通進路には、ガウス近似に基づく理論式に従う熱雑音のみを考慮した回路でビット誤り率を算出する方法が良く用いられている。一般に、拡散符号系列長が長いものを用いた場合、すなわち拡散率が高い方がビット誤り率は良くなり、高性能と言える。また、位相変調が周波数変調よりも占有帯域幅が広く、誤り率は良くなるわけであるが、「スペクトル拡散後の帯域幅を等しくする」という条件下で拡散系列長 (処理利得) を決定し、通進路にガウス雑音を用いて、計算機シミュレータの波形解析により、性能比較を行う。

すなわち、広帯域の信号 (PSK) に短い拡散系列を用いたものと、狭帯域の信号 (GMSK) に長い拡散系列を用いたものとのトレードオフ関係进行评估する。

2 システムの概要

2.1 DS/GMSK 送信機

図 1 に DS-CDMA 方式の変調方式に GMSK を用いた送信機のシステム構成を示す。

このシステムにおいて各ユーザはシンボル間隔 T において $\log_2 M$ ビットを送信するために符号の数 M が割り当てられる。拡散系列は N チップから成り立ち、 K 番目のユーザには拡散系列: $\alpha_1^{(k)}, \dots, \alpha_M^{(k)}$ で与えられる。 K

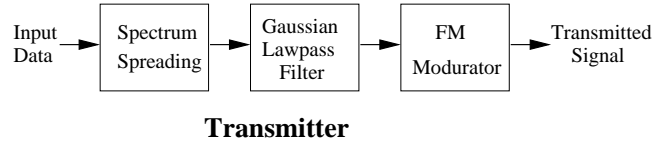


図 1: GMSK を用いた DS-CDMA の送信機

番目のユーザにおいて j 番目のビットの i 番目のチップは $\alpha_{j,i}^{(k)}$ と表示でき、またこの拡散符号は $\alpha_{j,i}^{(k)} \in \{1, -1\}$ である。本稿では 2 値の入力データ $a_n^{(k)} \in \{1, -1\}$ として考えている。それゆえに $M = 2$ となり各ユーザは 2 値の拡散符号系列が割り当てられる。

まず入力データ $a_n^{(k)} \in \{1, -1\}$ が 1 ビット入力されると拡散符号 $\alpha_j^{(k)}$ の系列によって拡散され (拡散符号のチップ間隔は $T_c = T/N$)、チップ間隔 T_c の方形波パルス信号 $d_{j,i}$ となる。

$$d_{j,i} = a_j \cdot \alpha_{i,j} \quad (1)$$

この信号がガウスフィルタに送られる。GMSK は CPM の一種であり、位相の連続性を示す関数 $g(t)$ は、次式で与えられる。[1]

$$g(t) = K \left\{ \operatorname{erf} \left[c B_b \left(t + \frac{T_c}{2} \right) \right] - \operatorname{erf} \left[c B_b \left(t - \frac{T_c}{2} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

図 2 にこの $g(t)$ の区間 $[-LT/2, LT/2]$ における周波数パルスを示す。 L は記憶されるチップ数 (本稿では $L = 3$ とする) である。このとき c は定数 $c = \pi \sqrt{2/\ln 2}$ 、 B_b は $g(t)$ を生成する時に用いるガウスフィルタの 3dB 帯域幅 (片側) であり、 K は $g(t)$ の面積が $1/2$ となるような定数をとる。区間 $[-LT/2, LT/2]$ において、 $B_b T$ がより小さいと周波数パルスは最も広がり、より帯域制限を行うことを意味する。

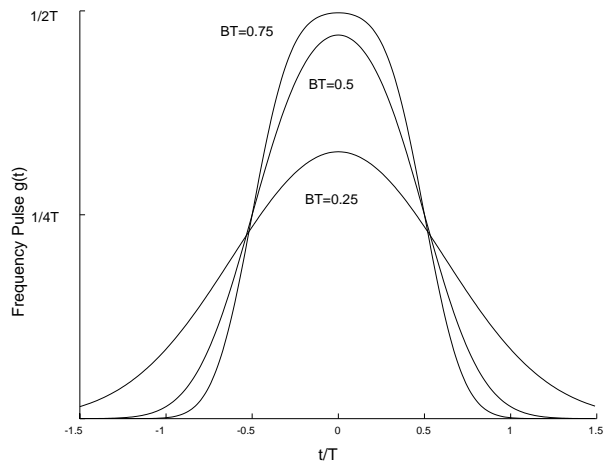


図 2: GMSK (BT=0.25, 0.3, 0.75) の周波数パルスの例

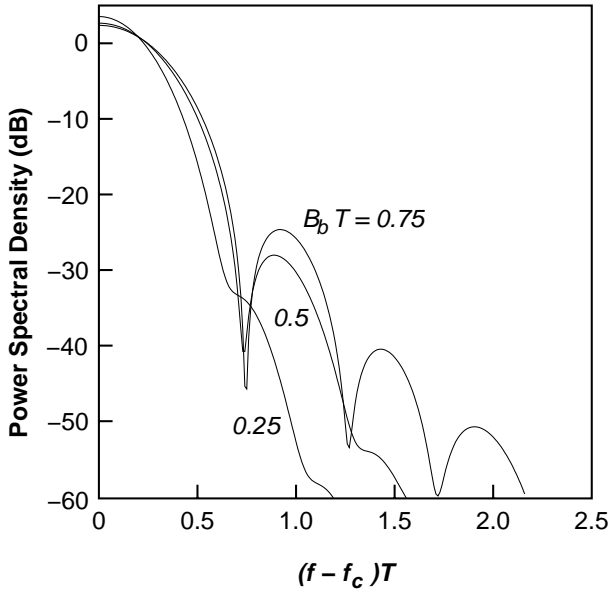


図 3: GMSK(BT=0.25,0.3,0.75) の電力スペクトル密度

図 3 に $B_b T$ の各値によるスペクトル特性を示す。この図 3 からわかる通り、 $B_b T$ が小さくしていくにしたがって、より良好なスペクトル特性が得られる。このガウスフィルタによりデータ信号 $d_{j,i}$ に帯域制限がかけられ、位相連続関数 $\theta(t)$ が変調指数 $h = 0.5$ の周波数変調により作られ、

$$\theta(t) = 2\pi h \sum_{i=0}^{N-1} d_{j,i}^{(k)} \int_{iT_c}^t g(\tau - iT_c) d\tau \quad (3)$$

となり、送信信号 $s(t)$ は搬送波周波数 f_c にのせられ、

$$s(t) = A \cos[2\pi f_c t + \theta(t)] \quad (4)$$

と表せる。ここで A は信号の振幅である。[1] [2]

このスペクトル拡散された送信信号 $s(t)$ の帯域幅は拡散系列長によって決定される。拡散符号系列長 N による処理利得を G とする。($G = N$)。

図 4 に GMSK 送信信号 $s(t)$ の最小距離を示す。[1]

最小距離 d_{min}^2 はデータ信号 -1 と 1 に対して割り当てられる GMSK 波形のユークリッド距離が最小となるときの、信号間の距離である。図 3 に示す通り、 $B_b T$ が小さくなるにつれ、信号間の距離も小さくなる (より類似した信号を送信する) ことがわかる。以下の式 (5) は GMSK の誤り率の理論式である。この式からもわかるように、 d_{min}^2 は誤り率に影響し、この値が小さくなるにしたがい、誤り率も劣化する。

$$p = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{d_{min}^2 E}{2N_0}} \right) \quad (5)$$

ここで、 E は送信信号のシンボルごとの電力、 N_0 は AWGN の雑音強度である。

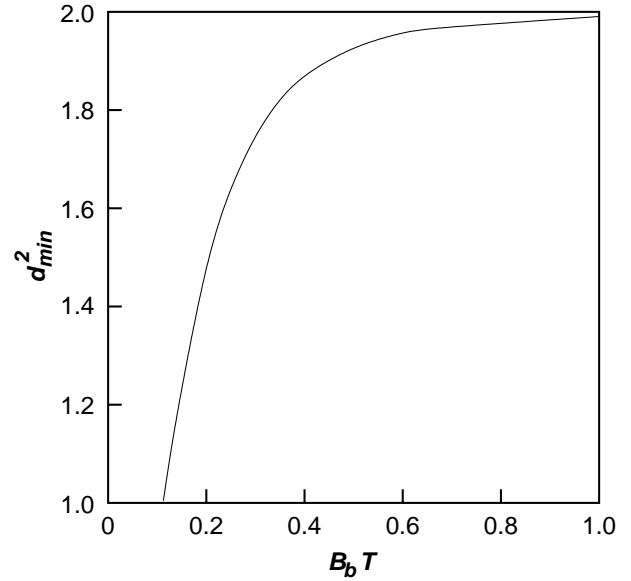


図 4: GMSK 信号の最小符号距離

2.2 DS/GMSK 受信機

受信機のシステム構成を図 5 に示す。[2] [3]

送信側から出力された信号は、通進路 AWGN を通り、また他のユーザの干渉を受け、受信アンテナから受信される。受信側では、図 5 に示すように、送信側と同じ波形を用意し、受信波形との相関をとることで受信データを決定し、判定する。

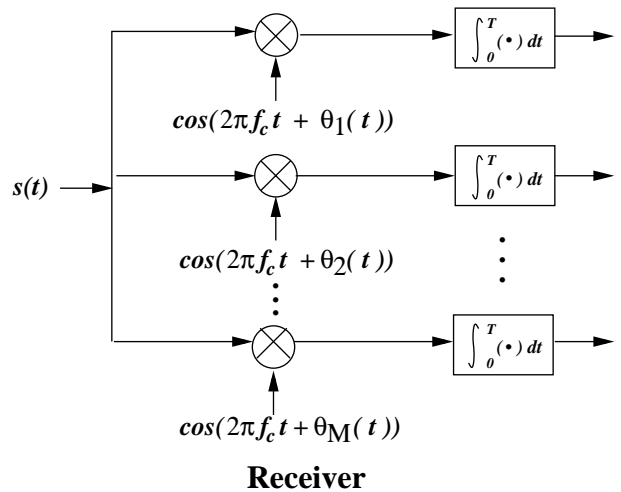


図 5: GMSK を用いた DS-SS の受信機

3 性能評価の条件

スペクトル拡散システムにおいて、拡散前の帯域幅 B と処理利得 G とすると、「拡散後の帯域幅を等しくする」

という条件では以下の式が成り立つ。[2]

$$BG = \text{constant} \quad (6)$$

一般に、帯域幅の広い信号はビット誤り率が良くなるが、スペクトル拡散システムにおいては、この式からもわかる通り広帯域の信号に比べ、狭帯域の信号にはより大きい拡散系列長をかける(拡散率を上げる)ことが可能となる。すなわち GMSK は PSK に比べて狭帯域の信号であり、ビット誤り率は PSK(広帯域) に比べて悪くなるが、拡散率を上げることができる。本稿では拡散率を上げることで、変調方式に GMSK を用いたビット誤り率が PSK を用いた時よりも良くなるであろうとの考えから、それぞれの変調方式を CDMA に用いて性能評価を行う。

そのためには、それぞれの変調方式の帯域幅の特性を知る必要がある。そして次の項目に示す帯域幅の定義により処理利得を求める。求めた処理利得を用いて伝送路を同時に使用するユーザ数をパラメータとして計算機シミュレーションを行い、誤り率特性を検討する。

3.1 帯域幅

帯域幅は本来無限大に広がっているため、どこまでを帯域幅とするかを定義しなければならない。本稿では全電力のうち 90% を含む帯域幅を 90% 帯域幅 ($B_{90\%}$) とし、99% を含んだ帯域幅を 99% 帯域幅 ($B_{99\%}$) として定義することにする。

図 6 に本稿で使用される変調方式の電力スペクトル密度を示す。[1] [2]

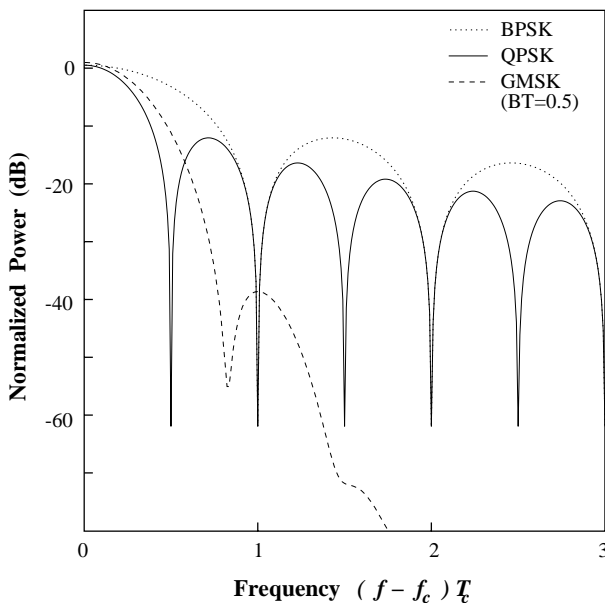


図 6: PSK 及び、GMSK(BT=0.5) の電力スペクトル密度

電力密度から変調方式の帯域幅が求められるので、それぞれの 90%、99% 帯域幅を表 1 に示す。

表 1 帯域幅

変調方式	$B_{90\%}$	$B_{99\%}$
BPSK	0.849	10.29
QPSK	0.424	5.156
GMSK(BT=0.5)	0.345	0.517
GMSK(BT=0.3)	0.300	0.457
GMSK(BT=0.25)	0.281	0.426
GMSK(BT=0.2)	0.257	0.396

3.2 処理利得

表 1 に示した帯域幅より処理利得が決定される。(5) 式より GMSK の拡散系列長 G_{GMSK} は BPSK の拡散系列長 G_{BPSK} を基準にして、以下のように求められる。

$$G_{GMSK} = \frac{B_{BPSK}}{B_{GMSK}} G_{BPSK} \quad (7)$$

この (7) 式に BPSK、GMSK(例として BT=0.5) それぞれの $B_{90\%}$ の値を代入すると、

$$G_{GMSK} = 2.4609 \times G_{BPSK} \quad (8)$$

となり $B_{90\%}$ においては GMSK(BT=0.5) は BPSK の 2.4609 倍の処理利得を得ることができる。すなわち、BPSK の拡散系列長の 2.4609 倍の拡散系列長を GMSK(BT=0.5) に用いることが可能となる。表 2 に $B_{90\%}$ 、 $B_{99\%}$ について、BPSK に対しての QPSK、GMSK の処理利得の比率を示す。

表 2 BPSK に対しての処理利得の比率

変調方式	$B_{90\%}$	$B_{99\%}$
QPSK	2.0024	1.9957
GMSK(BT=0.5)	2.4609	19.9226
GMSK(BT=0.3)	2.8300	22.5411
GMSK(BT=0.25)	3.0214	23.9581
GMSK(BT=0.2)	3.3035	25.9848

4 性能評価

4.1 拡散系列長

本稿は通進路にガウス雑音(AWGN)を用いて、計算機シミュレータの波形解析により、ビット誤り率を算出した。これにより PSK と GMSK の帯域幅と拡散率のトレードオフを考察する。なお、拡散系列には M 系列を用いた。[4]

今回は前述した処理利得(表 2)に従い、基準となる BPSK の処理利得を $G_{BPSK} = 31$ として、それぞれの変

調方式で使用する M 系列の拡散系列長を計算した。各変調方式の拡散系列長 G を表 3 に示す。

変調方式	$G_{B_{90\%}}$	$G_{B_{99\%}}$
QPSK	62	61
GMSK(BT=0.5)	76	618
GMSK(BT=0.3)	88	698
GMSK(BT=0.25)	94	743
GMSK(BT=0.2)	102	806

4.2 シミュレーション結果

この表 3 に従い、各変調方式とそれに対応した拡散率を用いて、SN 比に対するビット誤り率特性を出力した。図 7 にはユーザ数 7、90%帯域幅の $G_{BPSK} = 31$ という条件での結果を示し、図 8 にはユーザ数 7、99%帯域幅の $G_{BPSK} = 31$ という条件での結果を示している。

図 7 の 90%帯域幅では BPSK、QPSK、GMSK との間に性能の差はあまり見られないが、一般に通話品質の維持に最低限必要な誤り率 10^{-2} において、QPSK が最も高い性能を示した。これはデジタル変調時の誤り率が QPSK の方が GMSK よりも良く、また DS-CDMA において GMSK は QPSK に対し、1.5 倍程度の処理利得しか得られないため、と考えられる。しかし、このグラフの傾向として誤り率 10^{-3} 以下では、GMSK は QPSK の性能を上回ると予測できる。また GMSK において検討した中では、BT=0.25 ($G=94$) の組み合わせが最も高性能となった。

図 8 の 99%帯域幅の図では、GMSK が、誤り率 10^{-2} 、それ以下においても PSK よりも高い性能を示した。これは 99%帯域幅では、GMSK が QPSK に対し、10~13 倍の処理利得を得られるためである。ここでも GMSK において検討した中では BT=0.25 ($G=743$) が最も高性能となった。

5 まとめ

本稿では DS-CDMA において変調方式に GMSK と PSK を用いたときに拡散後の帯域幅を同じにするという条件での性能評価を行った。帯域幅と処理利得についてのトレードオフ関係を考察したわけであるが、GMSK が PSK よりも全体的に高性能であり、DS-CDMA においての有効性を示せた。また GMSK において、本稿で検討した中では GMSK の帯域幅を決定するパラメータが BT=0.25 のとき、最も高性能となった。

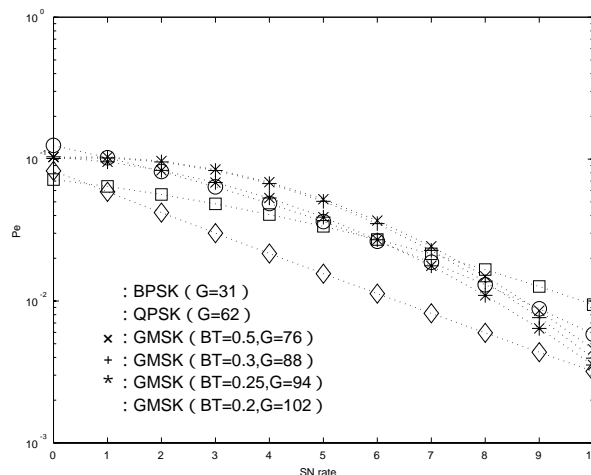


図 7: user=7, $G_{BPSK} = 31, B_{90\%}$

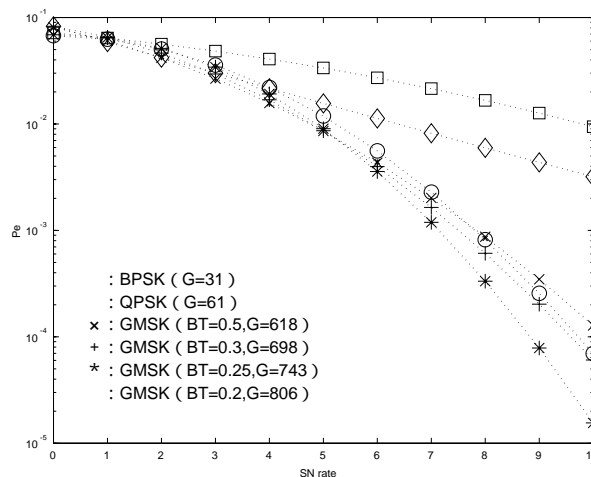


図 8: user=7, $G_{BPSK} = 31, B_{99\%}$

参考文献

- [1] D. K.Asano, T.Hitsuumi and S.Pasupathy, "Efficient Coding for GMSK," *Proc. of the 21th Symposium on Information Theory and Its Application (SITA '98)*, pp. 2-5, 1998.
- [2] 林 辰司 "DS-CDMA における CPM 変調方式の性能に関する研究," 信州大学大学院, 修士論文, 2000.
- [3] J.G.Proakis and M.Salehi, *Contemporary Communication Systems*, PWS Publishing Company, Northeastern University, pp.165-216, 1998.
- [4] 横山 光雄, "スペクトル拡散通信システム", 科学技術出版社, 東京都, 1988.