研究ノート

帯域幅利用効率の良いディジタル衛星通信変調方式

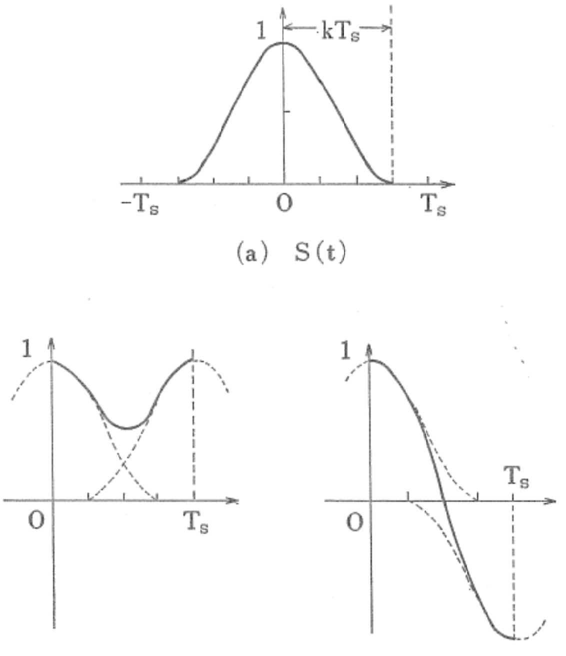
佐　藤　正　志*

1. はじめに

近年，関連電子技術の飛躍的な発展を背景に，多種多様な情報サービスが実現可能となるに伴ない，衛星通信回線に対する需要が急速に高まりつつある．一方，周波数資源が有限であることを考えると，増大する通信需要にこたえるためには帯域利用効率の良い衛星通信変調方式を開発する必要がある．

衛星通信においては衛星搭載の高出力増幅器（通常，進行波管（Traveling Wave Tube；TWT)が用いられる）において，電力効率を上げるため，TWT は飽和（非線形）領域で使用されることが多い．このため信号の変調方式としては包絡線変動の少ないものが望ましい．MSK（Minimum Shift Keying）方式等はこのような変調方式の一つであるが，電力スペクトル密度の帯域幅が広く，隣接して配置されている他チャネルへの妨害を引起すため，帯域通過フィルタによって帯域外輻射を抑圧する必要がある．しかしながら，このためフィルタ出力信号は包絡線変動を生ずることになり，これが前述の非線形高出力増幅器を通過すると，振幅変動分が位相変動を引起し（AM/PM 変換)，受信誤り率を劣化させるとともに，出力信号のスペクトルが再び広がって隣接チャネルへの妨害源となってしまう[1]．従って誤り率の重大な劣化を伴うことなく，帯域利用効率（単位帯域幅で伝送可能な，毎秒当りの情報ビット数）が改善出来て，かつ非線形増幅器からの影響が少ない変調方式を開発する必要がある．

本稿においては，筆者がカナダのオタワ大学電気工学科の Kamilo FEHER 教授の研究室に滞在中（1982年6年～1983年6月）に行なった研究の成果の一部をまとめたものである．



(a)　S(t)

(b)　$y_n(t)$

図1　基本信号波形

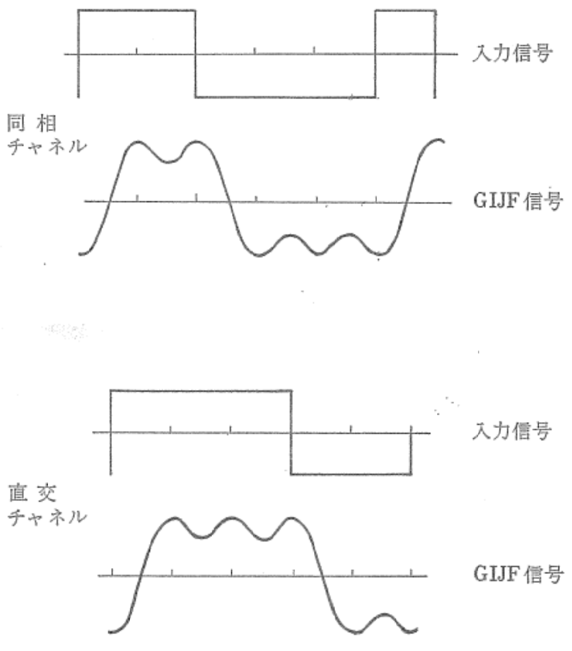


図2　G I J F信号波形

*佐藤正志（Masashi SATO），大阪大学，工学部，通信工学科，助手，工学博士，通信方式

Kamilo FEHER 教授等は数年前に帯域利用効率の改善を目ざして，符号間干渉とジッタのない（Inter-symbol interference and Jitter Free ; IJF）信号を提案した[2)3)]．しかし，この IJF 信号を用いた直交変調方式においては，3 dB の包絡線変動があるため，前述のように非線形増幅器を通過することによりスペクトルが広がることになる．

筆者は IJF 信号を一般化することにより，大幅に包絡線変動を改善し，それにより同一誤り率を達成するために必要とされる信号対雑音電力比の値を従来方式に比べて大幅に低減できることを見出した．

2．一般化されたＩＪＦ信号

一般化された，符号間干渉とジッタのない信号（Generalized Inter-symbol interference and Jitter Free Signal ; GIJF 信号）は次のように符号化器によって構成される．入力信号は±1の矩形波である．符号化器出力は次式で与えられる．

$$y(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n(t) \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

但し，

$$y_n(t)=a_{n-1}S[t-(n-1)T_s]+a_nS[t-nT_s] \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

であり，a_n は確率 0.5 で±1の値をとり，T_s は矩形波の時間幅を表し，S(t) は次式および

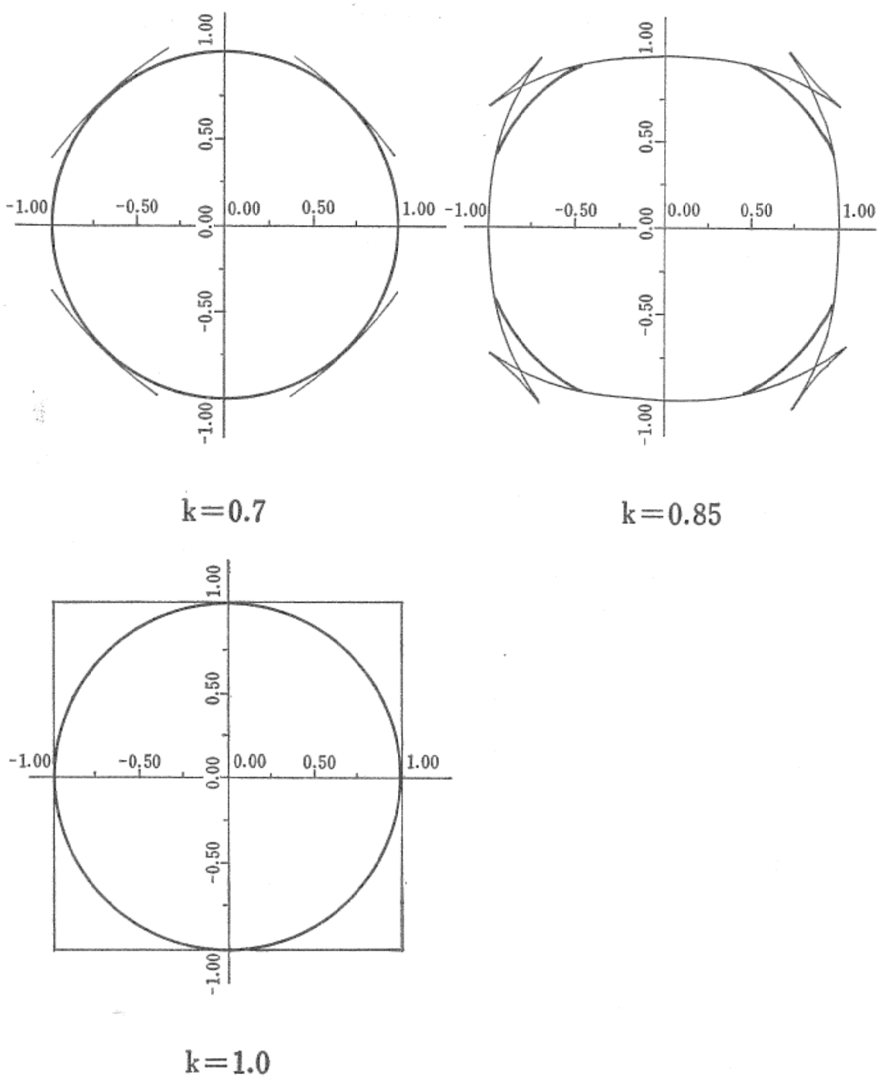


図3　ＧＩＪＦ信号のスペースダイアグラム

図1(a)に示されるような，いわゆる2乗余弦波である．

$$S(t)=\begin{cases}\frac{1}{2}\{1+\cos(\pi t/kT_s)\}\,;|t|\leq kT_s\\ 0\qquad\qquad\qquad\qquad\;;|t|>kT_s\end{cases}\qquad\cdots\cdots\cdots(3)$$

上式で k は $0.5\leq k\leq 1$ で，kT_s は S(t) の時間幅を示す．図1(b)に $y_n(t)$ を，図2に入力の矩形波とともに GIJF 信号の例を示す．

3．諸　特　性

$T_s/2$ だけ時間的にずれた2つの GIJF 信号 y(t) を，それぞれ $\cos\omega_c t$ と $\sin\omega_c t$ なる2つの搬送波に乗じた後合成したものは GIJF-OQ-PSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) 変調信号と呼ばれる．その包絡線の軌跡を図3に示す．図3で k=1.0の場合（従来の IJF 信号）は包絡線の軌跡は半径1の円と一辺が2の正方形から成り，従って振幅変動は最大で$\sqrt{2}$倍（3dB）となるが，k=0.7の場合には，ほぼ円に近づき，包絡線が一定に近いことがわかる．図4は計算機シミュレーションにより得られた GIJF 信号の電力スペクトル密度を示す．各スペクトルの形は IJF 信号（k=1.0）のそれと相似であり，k の値に応じて横軸（周波数軸）方向に引伸された形になっている．図5は GIJF 信号が衛星搭載の非線形増幅器を通過した段階での電力スペクトルを他の信号のそれと

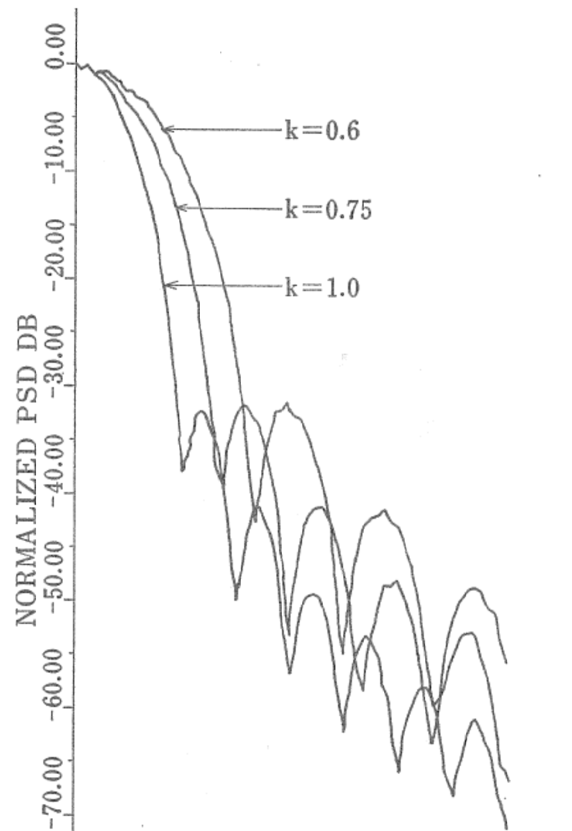


図4　GIJF信号の電力スペクトル密度

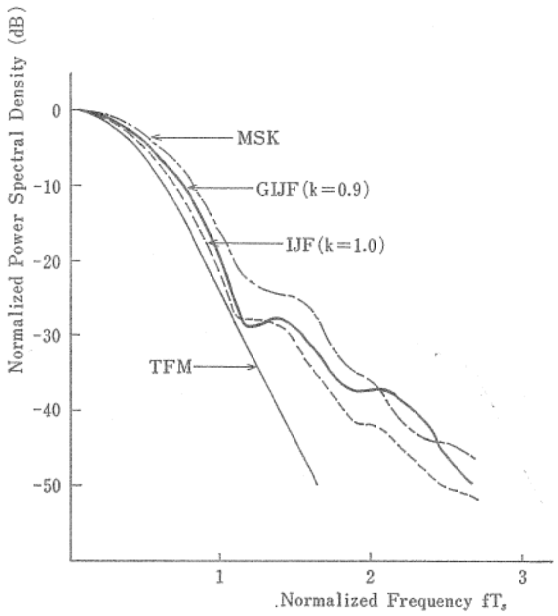


図5　非線形増幅器出力における電力スペクトル密度

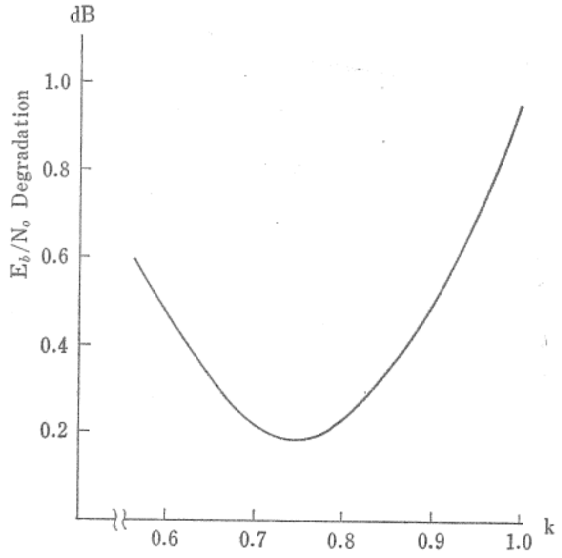


図6　E_b/N_0 の劣化量（$P_e=10^{-4}$ における $E_b/N_0=8.4$ dB を基準として）

比較して図示したものである．図より明らかなように GIJF 信号は MSK 信号よりも優れたスペクトル特性を持っており，実用上からは TFM（Tamed Frequency Modulation：定包絡線位相連続変調方式の１つ）信号とほぼ同等のスペクトル特性を持っている．

次に GIJF 直交変調方式の誤り率を計算機シミュレーションによって解析した結果を示す．解析モデルにおいては，送信側では特にフィルタは使わず，受信側でのみ全二乗余弦型の周波数特性を持つフィルタを用いている．図６は誤り率$=10^{-4}$を達成するために必要とされる E_b/N_0（E_b はビット当りの送信エネルギー，N_0 は白色ガウス雑音の電力スペクトル密度であり，両者の比 E_b/N_0 は信号電力対雑音電力の比に等しい）の値が理想値（$E_b/N_0=8.4$dB）から，いくら増加しているかを，重畳パルス波形S(t)の時間幅パラメータ k を横軸にとって目盛ったものである．図から明らかなように $k=0.75$ に選んだ場合には最小の E_b/N_0 の増加量で 10^{-4}の誤り率を達成することができる．その増加量は，わずか約0.2 dB であり，従来の IJF 信号の場合の約 1.0 dB に比べて大幅に低減されている．

4．あとがき

包絡線変動の改善を目的として，IJF 信号を一般化した信号を導入し，帯域利用効率を損なうことなく，同一誤り率を達成するために必要とされる信号電力対雑音電力比の値を，IJF 信号の場合と比べて大幅に低減できることを示した．GIJF 信号は，この優れた特性とハードウェアの簡便さとによってデジタル衛星通信システムへの適用が期待される．

参 考 文 献

1）D.H. Morais and K. Feher, “The effects of filtering and limiting on the performance of QPSK, offset QPSK and MSK system”, IEEE Trans., COM-28, Dec. 1980.

2）J. Huang, K. Feher and M. Gendron, “Techniques to generate ISI and jitter-free bandlimited Nyquist signals and a method to analyze jitter effects”, IEEE Trans., COM-27, Nov. 1979.

3）K. Feher, “Digital Communications：Satellite/Earth Station Engineering”, Prentice-Hall, N.J., 1983.