

同一周波数を用いた OFDM 信号と QAM 信号の多重伝送法

藤森 洋平^{*1}, 湯田 泰明^{*2}, 平松 勝彦^{*3}, 本間 光一^{*4}

Multiplex Transmission Method of OFDM Signal and QAM Signal Using the Same Frequency Band

(received on March 11, 2014 & accepted on July 8, 2014)

by

Yohei FUJIMORI^{*1}, Yasuaki YUDA^{*2}, Katsuhiko HIRAMATSU^{*3} and Koichi HOMMA^{*4}

Abstract

This paper presents a method of multiplex transmission method of OFDM signal used for a 4G cellular phone and QAM signal using the same frequency band. At first, symbol rate and transmission band of the QAM transmission system are determined. In the QAM receiving part, QAM signal ingredient is extracted from the received signal, inter-symbol interference is removed and QAM signal is demodulated.. It was checked by the computer simulation that each signal can be sent without mutual interference and data of 1.44[Mbps] can be transmitted with no bits error using QAM signal.

Keywords: OFDM, Wireless channel estimation, Burst Noise, Multiplex transmission

キーワード: OFDM, 無線チャネル推定, バースト雑音, 多重伝送

1. 概要

第4世代携帯電話¹⁾等に用いられる広帯域直交周波数分割多重(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)伝送信号に混入する雑音には受信器の入力端で生じる熱雑音と外部から加わるバースト雑音があり何れの雑音も伝送特性を劣化させる。そこで、熱雑音による無線回線推定特性劣化の改善については WSSUS (Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering)モデルを用い周波数域で雑音を抑圧する無線回線推定方法を提案しその推定性能の向上を図った²⁾。また、バースト雑音については、1パケットの受信信号内で伝送特性を改善しスループット特性の劣化を防ぐ方法について述べた。この伝送特性改善のために無線回線推定に参照信号逐次置き換え法やデータ伝送特性の改善に内挿補間法等を考案し、1[μs]幅程度の如何なる振幅のバースト雑音が混入しても回線推定歪と伝送誤りを完全に除去できることを示した³⁾。

そこで本稿ではバースト雑音の代わりに 1[μs] 幅程度の QAM 信号を多重伝送し、OFDM 伝送と同一の周波数を用いその伝送には影響を与えずに 1 [Mbps]程度の QAM 信号を多重伝送できる事を示す。まず、多重する QAM 信号のシンボルレートと伝送帯域を決定する。次に多重された受信信号から QAM 信号成分の抽出を行い、識別点のジッタを考慮して符号間干渉を除去し、無線回線の歪を等化後 QAM 復調器でデータの復調を行う。以上の方法により本稿では第4世代携帯電話で用いる OFDM 変調信号に同一周波数で QAM 信号を多重伝送しても OFDM 伝送特性に悪影響を与えること無しに 1.44[Mbps]の QAM 多重伝送が可能であることをシミュレーション評価結果と共に述べる。

2. 無線伝搬環境と OFDM 伝送システム

2.1 OFDM 伝送の無線伝搬環境

本研究で対象とする伝搬環境を Fig.1 に示す。基地局と移動局間の伝搬経路は遅延時間差のあるマルチパス伝送路となり、さらに 1[μs] 幅程度のバースト雑音が外部から混入することを想定する。この雑音は回線推定誤り特性とデータ伝送誤り特性の劣化を引き起こす。

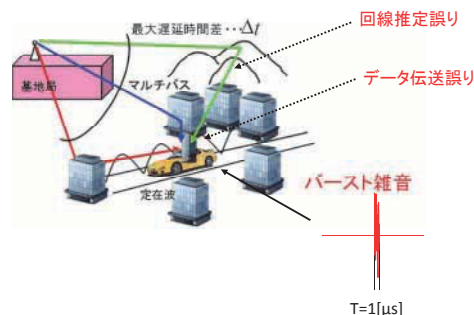


Fig.1 Frequency selective fading characteristic

*1 情報通信学研究科・情報通信学専攻・修士課程
Graduate School of Information and Telecommunication
Engineering, Course of Information and Telecommunication
Engineering

*2 パナソニック株式会社 AVC ネットワークス社
AVC 技術開発センター
AVC Technology Development Center, AVC Networks
Company, Panasonic Corporation

*3 パナソニック株式会社 R & D 本部 事業開発推進室,
Business Development Promotion Office, R&D Division,
Panasonic Corporation

*4 情報通信学部・通信ネットワーク工学科・教授
School of Information and Telecommunication Engineering,
Department of Communication and Network Engineering,
Professor

2.2 OFDM 伝送システム

本稿では、3GPP/LTE (4G 携帯電話システム)⁴⁾ の OFDM 伝送システムを対象にして以後の検討を進める。先ず、この OFDM 伝送システムの基本構成を各部の信号名と共に Fig.2 に示す。

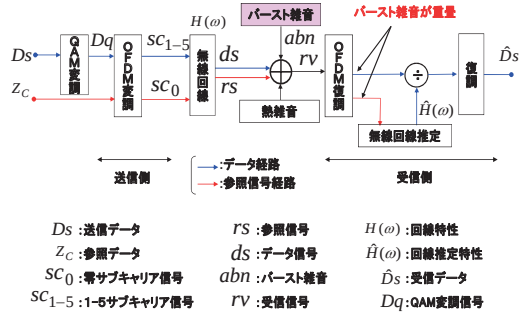


Fig.2 Structure of transmitter and receiver

また本システムの評価には 3GPP の規格を基にして定めた以下の諸元を用いる⁴⁾。

Table 1 Simulation Parameters of OFDM Transmission System

設定項目	設定値
搬送波周波数	3.5[GHz]
受信帯域	18[MHz]
サブキャリア間隔	15[kHz]
OFDMフレーム長	66.7[μs]
標本化間隔	32.6[ns]
二次変調方式	OFDM
一次変調方式	16QAM
サブキャリア	データ信号
	1000[本], 振幅: 1[V]
無線回線特性	データ信号
	200[本], ZCシーケンス
無線回線特性	Vehicular A 120km/h
バースト雑音の時間	1[μs]
評価データ数	200スロット

参照信号に Z_c (Zadoff-Chu) 系列を送信データにランダムデータを印加した場合の参照信号(rs)とデータ信号(ds)の各時間信号を模式的に Fig.3 に示す。 l は $l+6n(n=1, \dots, 200)$ の 200 本のサブキャリア番号を示す。基本周波数 (15kHz) の 6 の整数倍のサブキャリアに存在する参照信号はサブキャリア番号 (l) が零の部分に示すように 6 周期の信号となる。ここで 1OFDM シンボル間隔を 6 等分した各 RS スロット部分の信号を $\#n$ (RS スロット番号) で表わす。

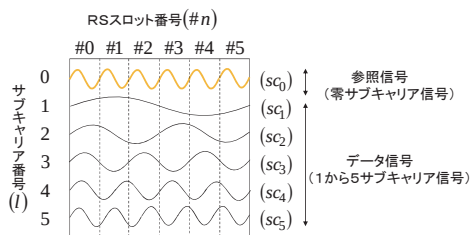


Fig.3 Time waveform of 1OFDM symbol

2.3 バースト雑音による特性劣化の改善

本伝送システムにバースト雑音が混入した場合、以下の 2 点の要因によりビット誤り率特性が著しく劣化する。

- (i) 雑音が参照信号に混入し無線回線推定歪が発生
- (ii) 雑音がデータ信号に混入し OFDM 復調信号に歪みが発生

無線回線推定歪は参照信号逐次置き換え法でその歪を 10 万分の 1 に低減でき、OFDM 復調信号の歪は上記回線推定特性を用いかつ内挿補間法等の技術を導入し取り除き、1 [μs] 幅程度の如何なる振幅のバースト雑音が混入してもその OFDM 伝送誤りを零に出来る事は既に示した³⁾。この OFDM 伝送システムの等化低域信号による構成を Fig.4 に示す。この場合、送信側の搬送波と同一の信号が受信側において再生できていると仮定している。

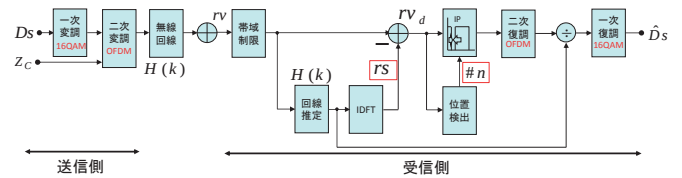


Fig.4 Block diagram of OFDM transmission system

3. QAM 信号の多重伝送法

本章ではバースト雑音の代わりに QAM 信号を多重伝送することを考える。前章に示した Fig.4 の構成を用いることによって、OFDM 伝送システムの伝送誤りを引き起こすこと無しに、1[μs]幅の QAM 信号をバースト雑音の代わりに多重伝送する事が出来る。以下に OFDM 伝送システムに QAM 信号を多重伝送する場合のシステム構成を Fig.5 に示す。

送信部は QAM 変調部と室内伝送を想定した無線回線部から、受信部は QAM 信号抽出部と波形整形部と復調部から成る。次章以下この順で各部の詳細について述べる。

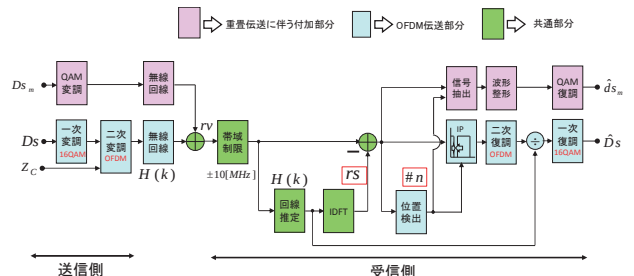


Fig.5 Block diagram of multiplex transmission system

3.1 QAM 伝送のシンボルレートと伝送帯域

システム構成の容易性と相互干渉の低減等の観点から多重伝送する QAM 伝送のシンボル信号と OFDM 伝送のシンボル信号は同期を取るものとする。このため QAM 信号の

シンボルレートは 30.72[Mbps]の整数分の一であり、一方受信帯域幅 (f_b) は 20[MHz] (搬送周波数を中心に ± 10 [MHz]) であるために、このままではナイキストの第 1 基準を満たさず QAM 復調部の入力信号に符号間干渉が生じ伝送誤りが生じる。そこでデジタルデータ伝送に伴う符号間干渉の除去を行うために QAM のシンボルレートと受信帯域幅の整合を取る必要がある。

まず、QAM 伝送のシンボル信号と OFDM 伝送の標準化信号 (OFDM 信号を 2048 分割) が同期を取り、且つ QAM 受信信号がナイキストの第 1 基準を満たすためには N を整数とし受信帯域幅 (f_b) は次式(1)を満たす必要がある。

$$f_b = \frac{30.72 \cdot 10^6}{N} [\text{Hz}] \quad (N: \text{整数}) \quad (1)$$

また受信帯域幅は次式(2)に示す様に 20[MHz]以下である必要がある。

$$f_b \leq 20 \cdot 10^6 [\text{Hz}] \quad (2)$$

以上の(1)式と(2)式より(3)式が得られる。

$$\frac{30.72 \cdot 10^6}{N} \leq 20 \cdot 10^6 [\text{Hz}] \quad (N: \text{整数}) \quad (3)$$

上式(3)を満たす最小の N は 2 となる。このために QAM 信号のシンボルレートを OFDM 伝送の標準化周波数の 2 分の一、つまり OFDM 信号の標準化間隔の一個置きに QAM 信号の各シンボルを配置すれば良いことが分かる。また、この場合の伝送帯域は (1)式に $N=2$ を代入することにより $f_b=15.36$ [MHz]となる。この時の QAM 伝送帯域を Fig.6 に示す。周波数配置は 2048 点の OFDM 変調信号の入力点の配置とし、0 は直流成分以降右に 15[kHz]きざみで正の周波数、2047 から左に 15[kHz]きざみで負の周波数を表す。またそのインパルス応答を Fig.7 に示す。このインパルス応答波形は 1 シンボル置きにシンボル間隔が零交差信号となり、この間隔で QAM 受信信号を配置するとデジタルデータ伝送に伴う符号間干渉を除去できることが分かる。

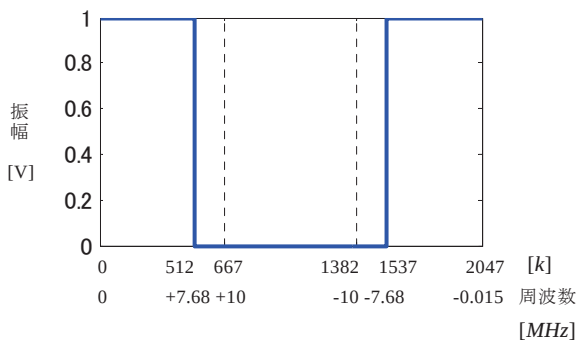


Fig.6 QAM signal transmission characteristic

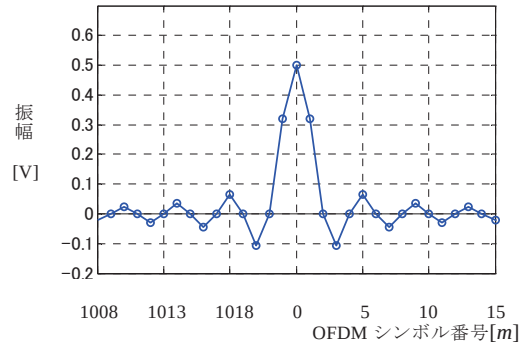


Fig.7 Impulse response

3.2 送信部

(1) QAM 変調部

前節の結果と以下の 2 項を前提にして QAM 変調部の主要諸元を決定する。

- QAM 変調信号幅を 1[μs]程度とする (OFDM 伝送特性に影響を与えないため)。
- QAM 伝送レートを 1[Mbps]以上確保する。

まず 1[μs] 幅の QAM 変調信号に搭載できるシンボル数 K を次式 (4)で算出する。

$$\frac{K-1}{15.36 \cdot 10^6} \cong 1 \cdot 10^{-6} \quad (K: \text{整数}) \quad (4)$$

上式(4)より $K=17$ となり、送信シンボル数を 17[symbol]と定める。

次に前記の伝送ビットレート 1[Mbps]以上を満たすための QAM 変調の多値数 M を決定する。OFDM シンボル長が 66.7[μs]であるので、QAM 伝送のビットレート 1[Mbps]を満たす QAM 変調多値数 M は次式(5)を満たす必要がある。

$$1 \cdot 10^6 \leq \frac{17 \cdot \log_2 M}{66.7 \cdot 10^{-6}} \quad (M: \text{多値数}) \quad (5)$$

上式(5)より $M \geq 16$ となる。17 シンボルには回線推定のためのシンボルも含む必要があるため余裕を見て多値数を一段階上げ $M=64$ の 64QAM 変調を用いる事にする。

(2) 無線回線部

今回は室内環境で 64QAM 多重伝送を行う想定し、伝送距離 10m 以内・移動速度は準静止とする。伝送距離が 10m 以内の場合では伝搬遅延差がシンボル間隔 1/15.36[μs]より十分短いので、無線伝搬路特性はレイリーフェージング特性となりレイリー分布に従って振幅は変動はするが周波数特性は平坦となり波形の歪は生じない。この無線回線のレイリーフェージングを Fig.8 に示す振幅が正規分布するガウス雑音源と振幅が一様分布する信号源を用いる構成でシミュレートする。ただし各信号は 1 スロット (slot) ごと独立に生成する。

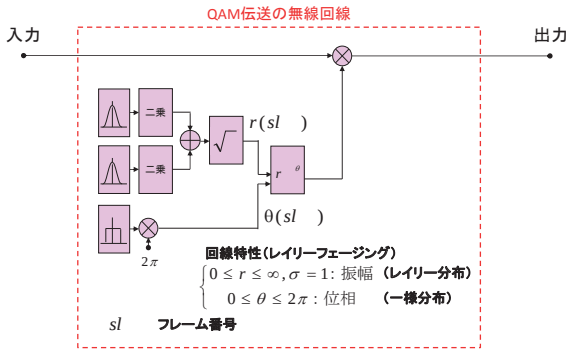


Fig. Block diagram of radio channel

(3) フレーム構成

QAM 伝送において受信側で無線回線の特徴を推定しその特徴を等化する必要がある。この回線推定の為に送信フレームに参照信号を挿入する必要がある。無線回線は準静止での動作という条件より 1[μs]幅のフレーム内で回線特性の変動を無視できる。以上の考察より参照信号は 1 シンボルの送信信号の内 1 シンボルを参照信号に用いればよい。また参照信号は移動による僅かな変動をも考慮しデータシンボルの中央に配置する。以上の点を考慮して決定した QAM 送信信号のフレーム構成を Fig. に示す。この信号を OFDM の RS スロット番号#1 のスロットの中央に多重して検討と評価を進める。

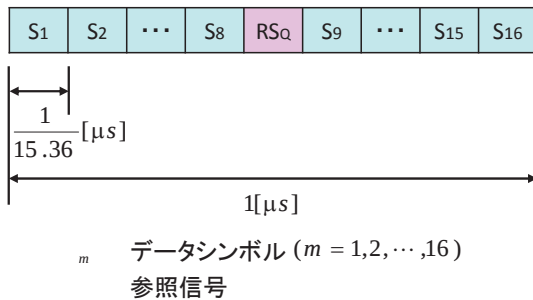


Fig. Frame composition of the transmission signal

3.3 受信部

受信部は (1) QAM 多重信号抽出部 (2) 波形整形部 (3) QAM 復調部の 3 部分で構成する。以後上記の順で各部について述べる。

(1) QAM 多重信号 (qam) の抽出

ここでは OFDM 受信信号に重畳した 1[μs]幅でパースト状の QAM 信号成分を抽出する方法とその評価結果について述べる。また QAM 信号の受信帯域幅は OFDM 伝送システムの受信帯域幅である 20[MHz]とする。以下の 3 ステップで、参照信号 (rs) とデータ信号の 2 信号から成る OFDM 信号とそれに多重された QAM 信号から成る受信信号から QAM 信号成分を抽出する。なお、受信信号から参照信号と QAM 信号を多重した RS スロット番号 (#n) を求める方法は既に述べてあり^{3) 5)}、以下ではこれらを用いて抽出を進める。

先ず OFDM 受信信号から参照信号を除去し、その信号の零サブキャリア信号を抽出する。更にこの信号を正確な 6 周期信号にするために、204 点のサンプル点数を 6 の倍数である 6144 点の信号に 3 倍アップサンプルし、その 6 周期の信号から QAM 信号が存在する位置の 1RS スロット 204 点の信号を切り出し、最後に 204 点の信号にダウンサンプルする。この構成を Fig.10 に、3 倍にアップサンプルされた信号の波形を Fig.11 に示す。ただし抽出された QAM 信号を qam と記す。

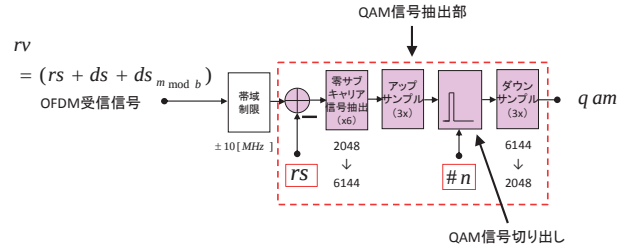


Fig.10 Block diagram of QAM signal extraction system

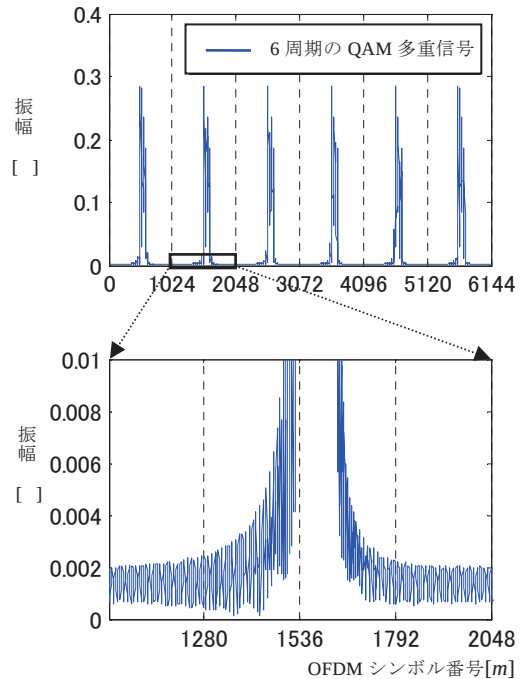


Fig.11 aveform of QAM signal of zero subcarrier

この 6 周期信号から QAM 信号が存在する位置の 1RS スロットを切りだし 3 倍のダウンサンプルした信号とその歪を Fig.12 に示す。この図に示す様に QAM 信号は完全に再生できず歪を伴ってしまう。これは Fig.11 から分かるように QAM 信号が OFDM 伝送帯域の 20[MHz]で帯域制限されるために過渡特性が生じ、その信号が 1RS スロット幅からはみ出し相互に歪を与えるためである。

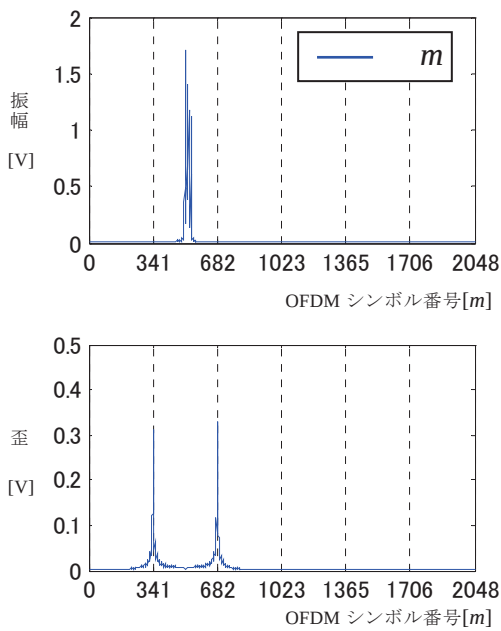


Fig.12 a e orm an istortion o estimate QAM signal

次にこの歪を除去するための改善法を以下に示す。
Fig.10 に示す QAM 信号の 1 スロットを切りだす QAM 信号検出部の前後の信号の周波数特性に過渡特性の収束性の高い自乗余弦波特性とその逆特性を乗じる。この構成を Fig.13 に示す。またこの時に用いた自乗余弦波特性を Fig.14 に示す。

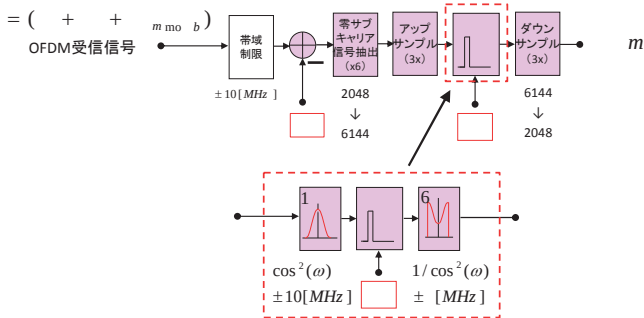


Fig.13 lock iagram o impro e system using s uare sine a e characteristic

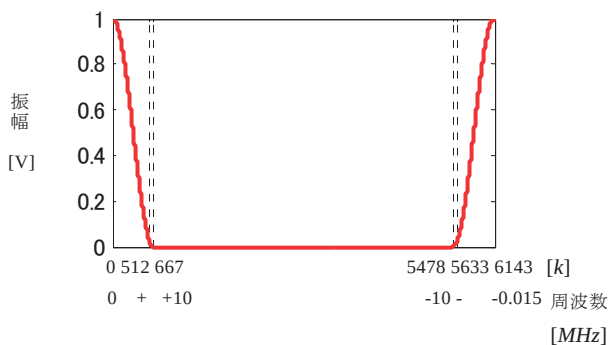


Fig.14 rans er characteristic o raise cosine

自乗余弦特性が乗じられた 6 周期の QAM 信号を Fig.15 に示す。この様に 6 周期の重畳信号は 1 スロット内に収まり相互の漏れ込みなしに QAM 信号成分を切り出すことができる。

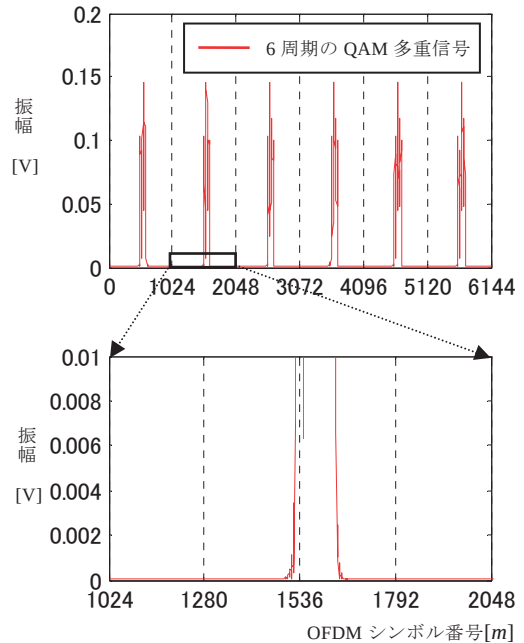


Fig.15 a e orm o QAM signal o zero subcarrier (sing raise cosine o trans er characteristic)

最後にこの信号の周波数特性を自乗余弦特性で除算して再生された QAM 信号とその歪を Fig.16 に示す。

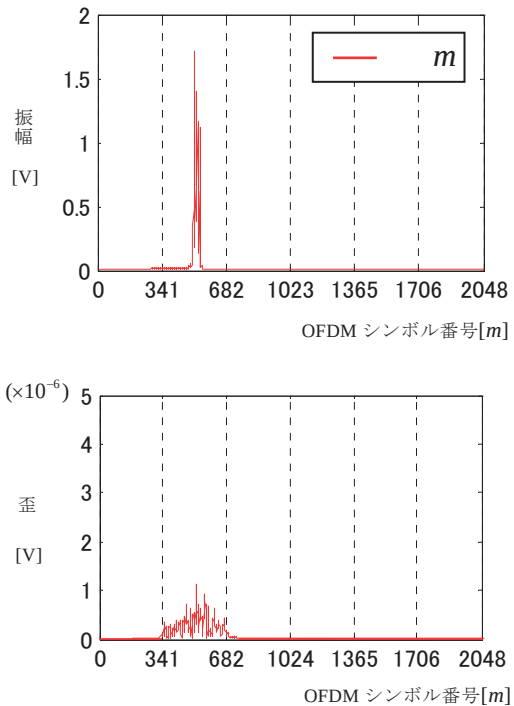


Fig.16 a e orm an istortion o estimate QAM signal (sing raise cosine o trans er characteristic)

この図から OFDM 信号に重畳された QAM 信号はほぼ歪がなく抽出できることが分かる。

(2) 波形整形部

シンボルレート 15.36[Msymb/s]の QAM 信号は無線区間で 15.36[MHz]の帯域が有れば符号間干渉なしに伝送出来る。しかしその信号は大きな過渡特性を有し標本化点のジッタに伴いシンボル誤りが生じる。そこで与えられた周波数帯域 20[MHz]を最大限に活用し過渡特性を抑圧することを考える。そこで遮断周波数は前 3.1 節で決定した

.6 [MHz]とし受信帯域を 20[MHz]用いることを条件に、ナイキストの第一基準を満たし符号間干渉を零にし、且つ過渡特性を抑圧するロールオフ特性で波形整形を施す。この特性に上記条件を満たす 33 ロールオフ特性を用いる。この 33 ロールオフの周波数特性を赤線で、波形整形を施さない .6 [MHz]の方形波 (0 ロールオフ) 特性を青線で Fig.1 に示す。

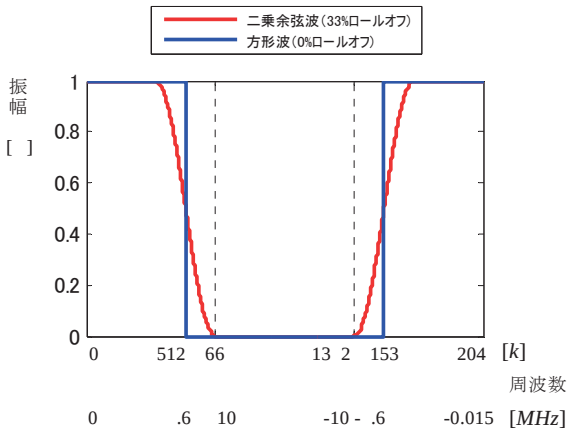


Fig.1 Transfer characteristics of 33 roll off

またこの 33 ロールオフ特性のインパルス応答を Fig.1 に示す。

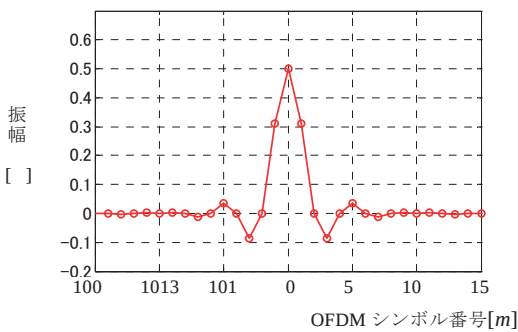


Fig.1 mpulse response (33 roll off)

Fig.1 は Fig. に比べてインパルス応答の収束性が高いことが分かる。次に方形波 (0 ロールオフ) で帯域制限を行った場合のアイパターンを Fig.1 の上図に、33 ロールオフで帯域制限を行った場合のアイパターンを Fig.1 下図に示す。 Fig.1 を見て分かる様に 0 ロールオフ特性を用いた場合に比べ 33 ロールオフ特性を用いた場合の方がアイの開きが広く、サンプル点のジッタに伴うシンボルエラ

ーを低減できた事が分かる。

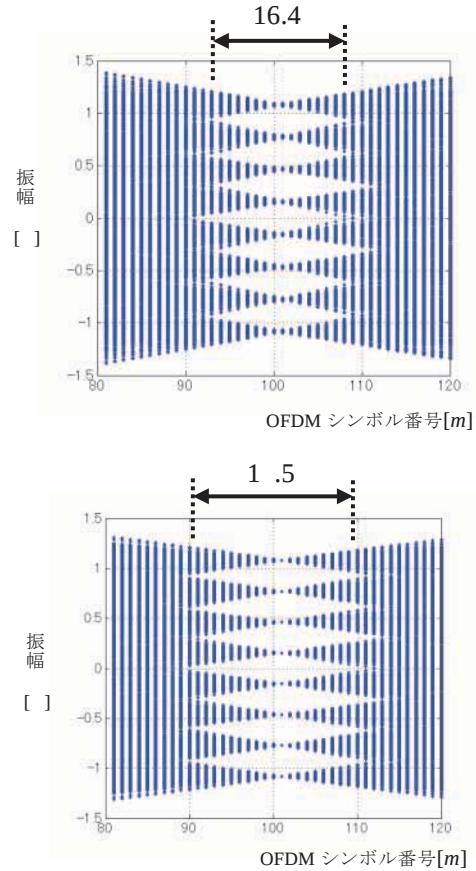


Fig.1 Eye pattern of using 0 roll off and 33 roll off characteristics

(3) QAM 復調部

ここでは無線回線歪の等化と 64QAM の復調を行う。まず、QAM 信号を 33 ロールオフ二乗余弦特性で帯域制限した信号の参照信号シンボル信号を抽出し、その信号でデータの 16 シンボルを除算し無線回線の等化を行う。次にその信号を実部と虚部に分離後それぞれ識別を行い 64QAM の復調を行う。この復調データを $\hat{D}s_m$ と記す。

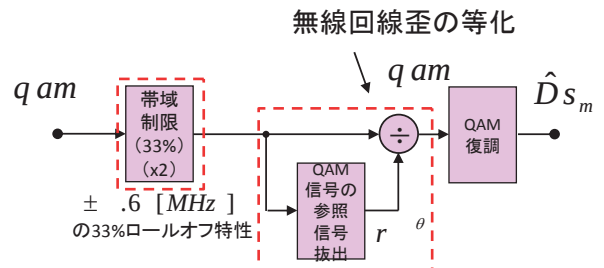


Fig.20 Block diagram of QAM demodulator

この様にして得られた無線回線の振幅が 1 の場合の 64QAM 復調器入力点のコンスタレーションを Fig.21 に示す。この Fig.21 から OFDM 伝送システムに 64QAM の多重伝送が可能なが確認できる。

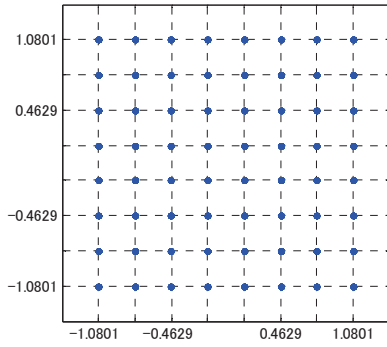


Fig.21 onstellation o 64 QAM emo ulator input signal

4. 評価結果

4.1 評価システムの構成

QAM 信号の多重伝送評価システムの構成を Fig.22 に示す. 受信信号から参照信号()とバースト状の QAM 信号が多重した スロット番号 (n) を求める方法は既に公表しており既知とする.

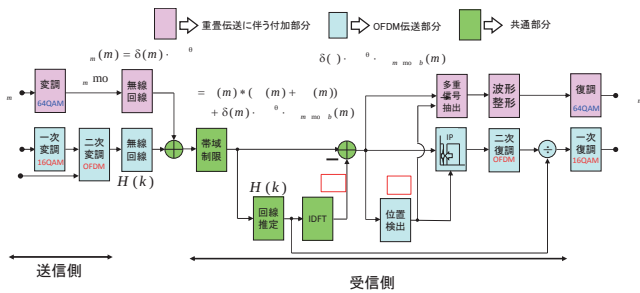


Fig.22 lock iagram o multiple transmission system o the OFDM signal an the QAM signal

4.2 シミュレーション評価条件

OFDM 伝送システムの主要諸元は既に able 1 に, QAM 伝送システムの主要諸元を able2 に示す. これらの諸元を条件にシミュレーションによる評価を実施する.

4.3 評価結果

OFDM 伝送システムのビット誤り特性を Fig.23 に, それに多重伝送する 64QAM 伝送システムのビット誤り特性を Fig.24 に示す. それらの図には多重処理による伝送誤りの低減処理を施した場合と何等誤り低減処理を施さなかった場合について示している. これ等の図から, すでに述べたバースト雑音除去法で QAM 信号を OFDM 信号に多重 (混入) しても OFDM 伝送のビット誤りを零に出来, また本文で示した方法によって OFDM 信号が混入しても QAM 多重伝送誤りを零にすることが可能であることが確認できる. すなわち本方法によれば OFDM 伝送と QAM 伝送が同一周波数でお互いに影響を与えず独立に伝送できる事が分かる.

able 2 imulation parameters o the QAM transmission system

設定項目	設定値
搬送波周波数	3.5[GHz]
変調方式	64QAM
データ信号	16[symbol], 振幅 : 1[V]
参照信号	1[symbol], (1+j0)
無線回線特性	振幅 : レイリー分布 ($\sigma = 1$) 位相 : 一様分布 ($0 \leq \theta \leq 2\pi$)
シンボル間隔	65.2[ns]
受信帯域	± 10 [MHz]
送信フレーム数	200[フレーム]
熱雑音	なし

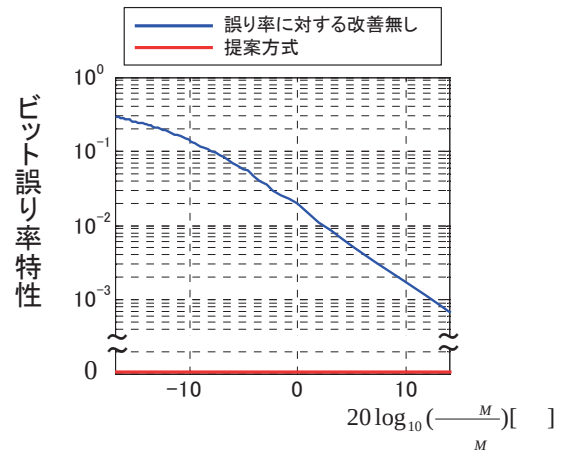


Fig.23 it error late o OFDM transmission system

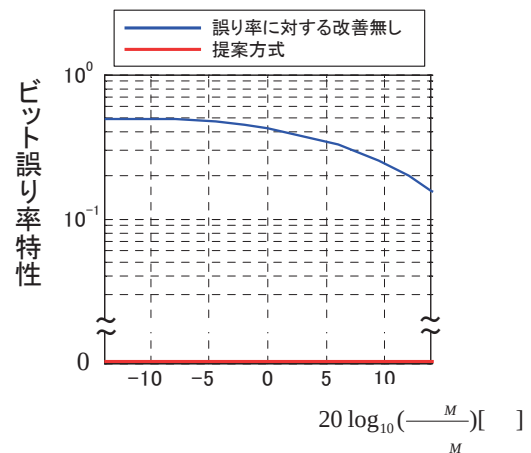


Fig.24 it error late o QAM transmission system

5. まとめ

第 4 世代携帯電話で用いる OFDM 伝送信号に 1[μs]程度の如何なる振幅のバースト雑音が混入してもその回線推定歪と伝送誤りを完全に除去できることは既に示した。そこで本稿ではバースト雑音の代わりにバースト状の QAM 信号を多重伝送する方法を考案し、OFDM 伝送誤りを零のまま下記の提案方法により 1.44[Mbps]の信号を誤り無しに同一周波数帯で多重伝送できる事を示した。まず、システム構成の容易性と相互干渉の低減等の観点から多重伝送する QAM 伝送の各シンボル信号と OFDM 伝送システムの標本化信号が同期を取るものとし、且つ QAM 伝送に号間干渉が生じないことを考慮して QAM 信号のシンボルレートを 15.36[Mbps]伝送帯域を 15.36[MHz]とした。またデータ伝送レート 1[Mbps] 以上を条件に QAM 変調多値数を決め 64QAM の多重伝送とした。室内での使用を仮定して QAM 変調信号の無線伝搬路をレイリーフェージング環境と想定した。受信部は QAM 多重信号抽出部・波形整形部・QAM 復調部の 3 部分で構成した。QAM 多重信号抽出部では参照信号とデータ信号から成る OFDM 信号と QAM 信号から成る受信信号から QAM 多重信号を抽出する。これは受信信号から OFDM の参照信号を除去し、さらに OFDM の零サブキャリア信号を抽出することによって 6 周期の QAM 信号を抽出し、最後にその 1 周期分を切り出すことで QAM 信号成分を抽出する。しかしこの 6 周期の QAM 信号は OFDM 伝送の帯域制限によって過渡特性が生じて 1 周期幅収まらず QAM 信号を正確に抽出できない。そこで切り出しの前の信号の周波数特性に自乗余弦特性を乗じ過渡特性を収束させて 1 周期を切り出し、その後に逆特性を乗じ歪無く QAM 信号を抽出した。シンボルレート 15.36[Msymb/s] の QAM 信号は 15.36[MHz]帯域で符号間干渉なしに伝送出来る。しかしその出力は大きな過渡特性を有し標本化点のジッタに伴いシンボル誤りが生じてしまう。そこで、遮断周波数 0.6 [MHz]を固定し受信帯域 20[MHz]を最大限に活用することを考慮し帯域制限特性に 33 ロールオフ特性を用いた。最後に送信信号に埋め込んだ 1 シンボル信号を用いレイリーフェージングの等化を行い 64QAM 信号の復調を行った。この提案法により第 4 世代携帯電話の OFDM 伝送に伝送誤りを引き起こす事なしに 64QAM 信号を多重でき、かつこの 64QAM 多重信号を用い室内で誤りのないデータを伝送が可能となった。またシミュレーションを用いて両伝送にデータ誤りが無くかつ 64QAM 多重伝送によって 1.44[Mbps]の伝送速度でデータを多重伝送できる事が確認できた。このように本提案法は第 4 世代携帯電話に用いる OFDM 信号と QAM 信号が同一周波数で互いに干渉せず独立に多重伝送が可能となり周波数の有効利用に生かせることが分かった。

参考文献

- 1) 原田他, Super 3G (LTE) の方式概要および実験結果, IT 技術ジャーナル 200 .11
- 2) 山下他, SS S モデルを用いた広帯域 OFDM システムの無線伝送推定方法の検討, 東海大学紀要情報理工学部, ol.2 o.1 200
- 3) 藤森他, OFDM 伝送システムにおけるバースト雑音

による伝送特性劣化の改善について, 東海大学紀要情報通信学部, ol.6 o.2 2013

- 4) [http //www.3gpp.org/](http://www.3gpp.org/)

- 5) 藤森他, OFDM 無線伝送システムにおけるバースト雑音による回線推定精度劣化の零サブキャリア信号を用いた改善, 東海大学紀要情報通信学部, ol.6 o.1 2013