

同報通信システム評価実験

山本伸一 川崎和義 佐藤正樹

技術試験衛星VIII型を用いた移動体向け同報通信実験を行った。本実験では通信方式に OFDM 方式を用いており、非線形特性を含む衛星回線を用いた場合の伝送特性を取得し、OFDM 信号伝送への影響についてデータを取得した。また、実験車を用いた走行実験では郊外道路やビルの多い走行環境などを走行し、受信品質及びマルチパス等による影響について評価を行った。

1 はじめに

技術試験衛星VIII型 (ETS-VIII) を用いて、通信方式に OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重) 方式を用いた同報通信実験を行った。OFDM 方式は、多数の搬送波を用いてデータを伝送するマルチキャリアデジタル変調方式である。隣接する搬送波は互いに直交しており、スペクトルが重なりあった状態で伝送しても受信側でデータを復調できるため、搬送波の間隔を通常の周波数分割多重方式より狭くすることができ、伝送周波数帯域を効率良く利用することが可能である。また、伝送するデータを多数の搬送波に分散させて変調するため、各搬送波の変調速度は小さく、シンボル長を長くでき、さらに、ガードインターバルを各シンボルに挿入することで、マルチパスによる遅延波が受信された場合でも、シンボル間干渉を受けにくいという利点があり、自動車等の移動体での受信に適している。しかし、伝送路が非線形特性を有する場合、OFDM 信号を構成する各搬送波間の相互変調の影響により、伝送特性に劣化が発生しやすい。また、衛星回線においては、衛星搭載機器の電力制限から、中継器の高出力増幅器を非線形領域で使用する人が多い。そこで、実験では、衛星回線を用いて OFDM 信号を伝送した時の、伝送路の非線形特性による伝送特性への影響及び実験車を用いて郊外の道路やビルが多い市街地を走行したときの建物等からのマルチパスによる遅延波の影響についてデータを取得した。また、これらの取得データから走行時の受信品質の評価を行った。本稿では、これらの実験概要並びに実験結果について述べる。

2 実験概要

2.1 OFDM 実験システム

本実験で用いる OFDM 信号は、移動体向けの高品質

なデジタルオーディオ放送の規格である Eureka147 Digital Audio Broadcasting (DAB)^[1] に準拠したものである。この DAB 規格は ITU-R において受信品質などが規定されている^[2]。実験では、衛星放送用の規格である MODE III を用いた。表 1 に MODE III の送信パラメータを示す。OFDM 信号を構成する各搬送波の変調方式には、 $\pi/4$ shift Differential QPSK 方式を用いており、有効シンボル長は 0.125msec、ガードインターバル長は 0.031msec である。

DAB 規格では送信信号に符号化率 = 1/3、拘束長 = 7 の畳み込み符号化による誤り訂正が施されるが、実験に用いた OFDM 信号発生装置では誤り訂正を行わない設定とすることができるようになっており、また、試験用信号として疑似雑音 (Pseudo Noise: PN) 符号の発生も可能で、実験では、これらの機能を利用して、デジタル通信の基本伝送特性であるビット誤り率 (BER) を主に測定した。図 1 に実験システム構成図を示す。送信側の地球局には、鹿島宇宙技術センター内に設置してある Ka 帯フィーダリンク局を用い、受信側は、同じく鹿島宇宙技術センター内に設置してある S 帯基準局を用いている。移動環境下での実験時にお

表 1 OFDM 信号の形式

	MODE III
変調方式 (サブキャリア変調方式)	OFDM ($\pi/4$ shift D-QPSK)
OFDM シンボル数 (NULL を除く)	153
キャリア数	192
キャリア間隔	8 kHz
フレーム長	24 ms
NULL シンボル長	0.168 ms
OFDM シンボル長	0.156 ms
有効シンボル長	0.125 ms
ガードインターバル長	0.031 ms
変調波帯域幅	1536 kHz

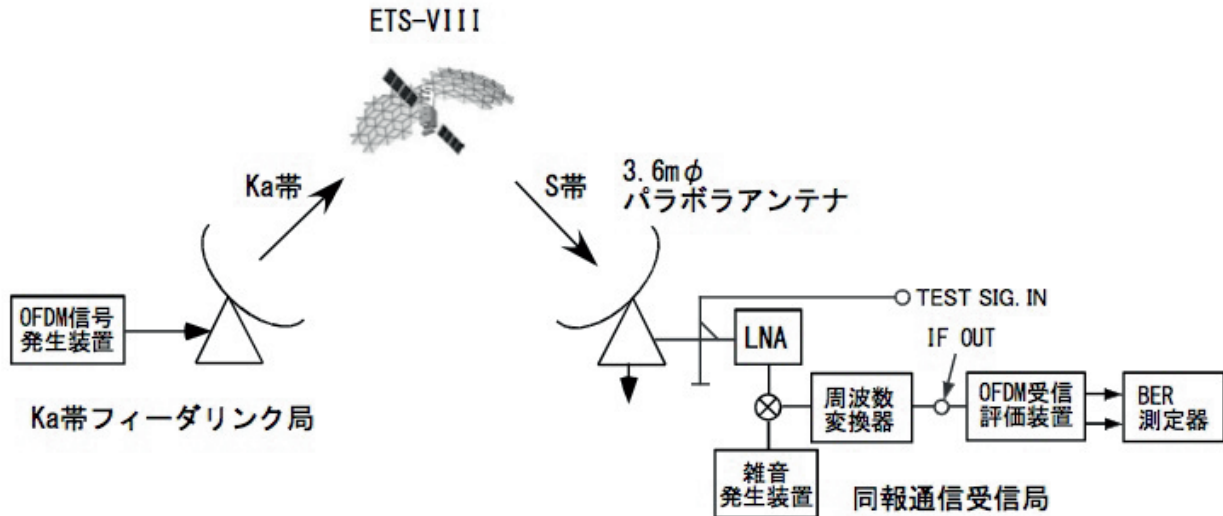


図1 実験構成図

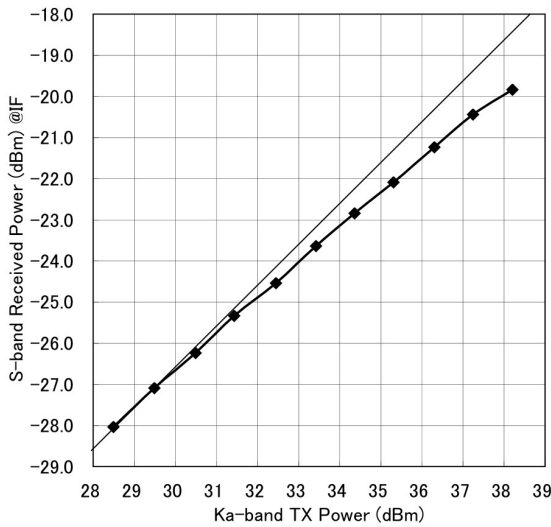


図2 衛星回線を含む伝送路の入出力特性

いては、OFDM 信号の復調器である OFDM 受信評価装置や BER 測定器等を測定用車両へと搭載し、アンテナには小型軽量の 1 素子マイクロストリップアンテナを車両の上部へ設置して受信局を構成し、車両走行中におけるデータを取得した。

2.2 伝送特性の測定

2.2.1 伝送路の非線形特性の測定

伝送特性の測定では、まず、伝送路の非線形性を確認するために伝送路の入出力特性を取得した。

図2は入出力特性の測定結果である。横軸はKa帯フィーダリンク局の高出力増幅器の出力電力である送信電力、縦軸はS帯側のダウンコンバータの出力電力、すなわちOFDM受信評価装置の入力電力である。測定にはOFDM信号を用い、受信電力の測定はスペクトラムアナライザにて行った。なお、受信時の信号対雑

音比 (S/N) は 20dB 以上であり、測定時の雑音の影響は無視できる。

図には、線形特性を直線にて示しているが、測定結果から、Ka帯フィーダリンク局の送信電力が+30dBmを超えると、伝送路が非線形特性になることがわかる。また、伝送路の入出力特性が、線形領域の入出力特性から1dBだけ圧縮される点である、いわゆる1dBcompressionでのKa帯フィーダリンク局の出力電力は、+36.6dBmと読み取れる。

2.2.2 伝送特性の測定

非線形特性をもつ伝送路においてOFDM信号を送信したときのBER特性を取得し、伝送路の非線形特性による伝送特性への影響を調べた。

伝送路の非線形の影響を測定するため、まずは、前項で述べた1dBcompressionであるKa帯フィーダリンク局の出力電力値を+36.6dBmとして、OFDM信号を送信し、受信局側では、LNA(低雑音増幅器)から出力された信号に雑音発生装置からの雑音を付加し、この雑音レベルを調整することでOFDM信号評価装置に入力する信号の搬送波電力対雑音密度比(C/No)を変化させ、C/No対BERの特性を取得した。さらに、Ka帯フィーダリンク局の出力電力を+36.6dBmから、+2dB、-4dB、-8dBと変化させ、受信側のC/No値は、さきほどと同様に、雑音発生装置からの付加雑音電力を調整することで、C/No対BER特性をそれぞれについて取得した。結果を図3に示す。図3では、基準となる1dBcompressionでの値を0dBと表記し、残りはそれぞれの相対値である+2dB、-4dB、-8dBとしている。図3のRF折り返し特性は、室内実験で取得したデータで、信号は衛星を経由せず、図1に示すOFDM信号発生装置の出力信号をS帯の信号周波数である2.5GHz帯へと変換し、同報通信受信局のテスト

信号入力端子 (TEST SIG. IN) から入力することで、方向性結合器を介して LNA に入力し、OFDM 受信評価装置の BER を測定したもので、伝送路が線形特性のときの BER 特性である。

図 2 の伝送路の入出力特性から、基準から -8dB とした送信電力では、伝送路はほぼ線形特性になり、ここから送信電力を大きくしていくと、伝送路は非線形特性となる。図 3 より、送信電力が大きくなると BER の劣化が大きくなる傾向が見られ、BER が 2×10^{-4} となる C/N_0 値を比較すると、基準から -8dB の C/N_0 に対して基準から $+2\text{dB}$ の C/N_0 は約 1.5dB の劣化となり、伝送路の非線形特性の影響が現れている。

実験に用いた OFDM 信号は 192 の搬送波で構成されており、それぞれの搬送波は 8kHz の間隔である。このため伝送路に非線形特性があると、各搬送波間の相互変調によりスプリアスが発生し、各搬送波に重畳

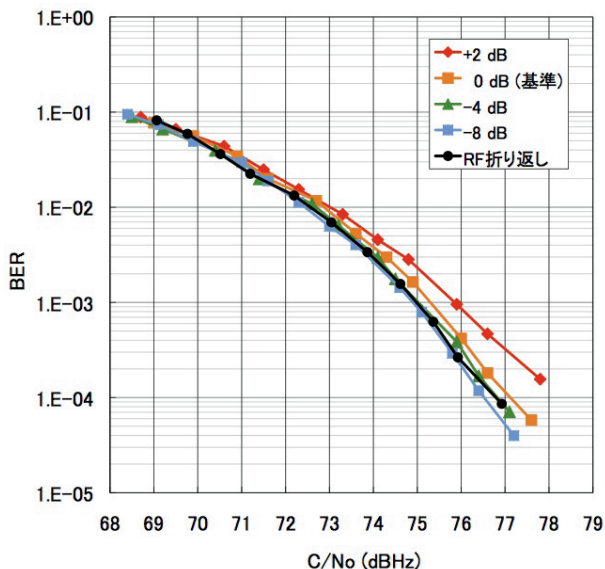


図 3 BER 特性

する。このため、実験結果に示されるように非線形領域で BER 特性が劣化する傾向が見れる。

2.3 移動受信環境における受信品質の評価

2.3.1 実験概要

OFDM 受信評価装置や BER 測定器等を測定用車両 (以下、移動受信局と呼ぶことにする。) に搭載し、走行時の受信品質を評価するためのデータを取得した。

走行中の移動受信局で衛星からの S 帯ダウンリンク信号を受信する場合、走行する道路周辺の建物や樹木によるシャドウイング及びブロッキング、さらに建物などからの反射波などの干渉によるフェージングにより、受信レベルの変動及びビット誤りが発生すると考えられる。

実験では、異なった走行環境において移動受信局を走行させ、衛星からの S 帯ダウンリンク信号の受信電力及びビット誤りを測定した。

図 4 に走行実験の構成図を示す。Ka 帯フィーダリンク局から OFDM 信号を送信し、ETS-VIII を経由した S 帯ダウンリンク信号を移動受信局で受信する。図 5 に移動受信局を用いた時の伝送路の入出力特性を示す。

走行中は道路周辺の建物や樹木によって受信状況が刻々と変化するため、信号の受信電力及び BER を短時間に測定することが必要になる。このため、1 データの計測時間を OFDM 信号の 10 フレーム分の時間である 240msec とした。 240msec の間で受信される情報ビット数は 30720bit であり、この中で 1 つのビットが誤ると、ビット誤り率としては 3.25×10^{-5} となる。電力測定はスペクトラムアナライザを用いて、受信される OFDM 信号の変調波電力の 240msec 間における平均値を測定した。また、実験車には距離パルス発生装置が装備されており、一定距離を進む毎にパルスを送信させる。走行実験ではこのパルスの発生間隔を

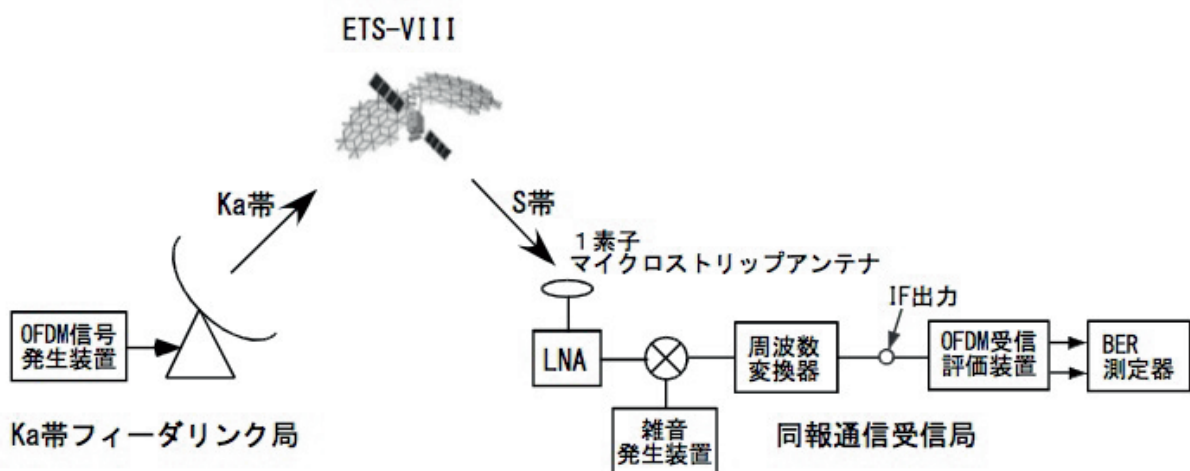


図 4 走行実験の構成図

3 移動体衛星通信システム実験

3mm に設定し、計測時間内のパルス数をカウントすることにより、実験車が移動した距離を取得した。OFDM の受信特性と比較するため、単一キャリアの QPSK 信号による伝送実験も実施した。実験に用いた QPSK 信号は、シンボルレートが 1200kspss、変調波の占有周波数帯幅は 1525kHz である。

2.3.2 停車時の受信品質

停車時の評価試験では、茨城県鹿嶋市内の、周囲に建物などの障害物があまり無く、衛星が見通せる場所に移動受信局を停車させ、衛星からの S 帯ダウンリンク信号を受信して、まずは、C/No 対 BER 特性を取得した。結果を図 6 に示す。

Ka 帯フィーダリンク局の送信電力は、図 6 の移動受

信局を用いたときの伝送路の入出力特性から概ね 1dB 圧縮点となる約 +36dBm とした。

図 7 は移動受信局で測定した受信電力から求めた受信信号の C/No の累積確率分布及び同時に測定した誤り訂正無しの BER の累積確率分布である。図 7 (1) の横軸は C/No、縦軸は受信した信号の C/No が横軸の値を下回る確率である。図 7 (2) の横軸は BER、縦軸は測定した BER の値が横軸を上回る確率である。測定の結果、測定時間内の受信信号の平均 C/No 値は 72.7dBHz、また累積確率分布における 1 から 99% の変動幅は約 1dB であった。一方、平均の BER は 1.1×10^{-2} で、BER は 7.2×10^{-3} から 1.8×10^{-2} の間で変化した。測定に用いた受信アンテナは、利得約 5dBi の 1 素子のマ

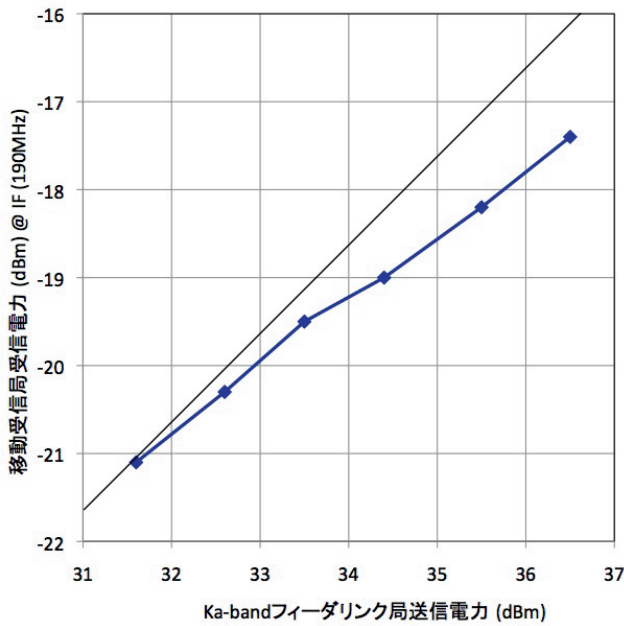


図 5 移動受信局を用いた時の伝送路の入出力特性

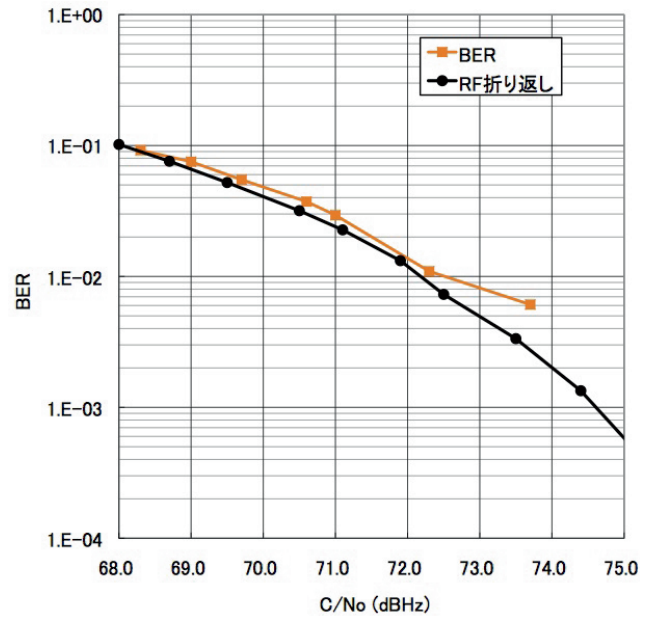
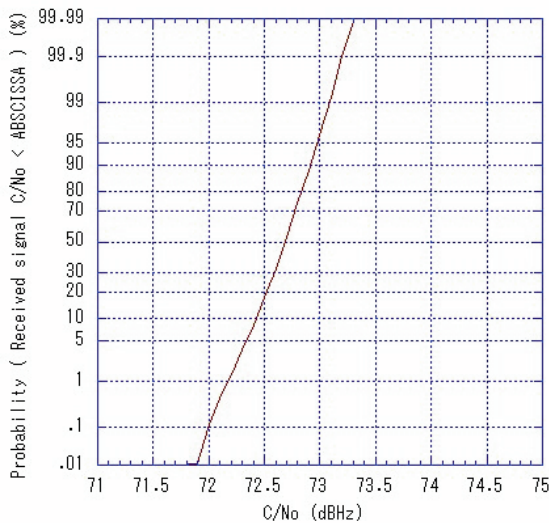
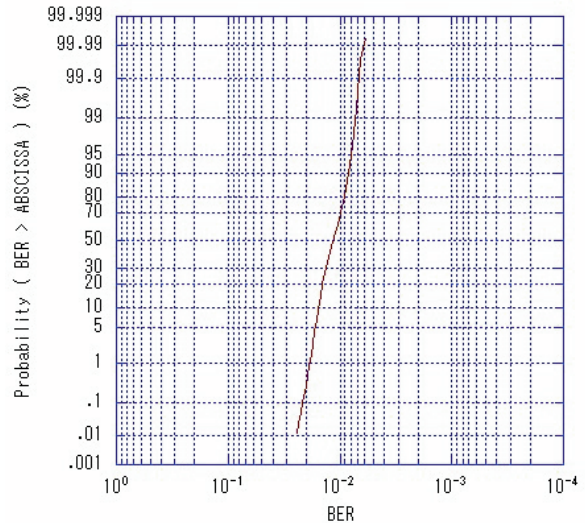


図 6 移動受信局の BER 特性



(1) 受信信号の C/No



(2) BER (誤り訂正無し)

図 7 停車時の受信信号の C/No 及び BER の累積確率分布

イクロストリップアンテナで、方位角方向にはほぼ無指向の特性をもち、仰角方向の利得半値幅は約 80 度となっている。この平面アンテナは車両のルーフ上に設置していることから、地面からの反射波は受信されていないと考えられる。また、周囲には障害物も見受けられないことから、受信した信号は、衛星からの直接波のみであると推定される。しかしながら、電力測定では、OFDM 信号の広帯域な変調波電力を計測したことから、受信電力を測定する測定系の信号の C/N は約 11dB であり、測定系としては十分な値を確保できていない。このため、図に示すように、受信電力の変動幅は約 1dB と、雑音の影響を受けて、やや大きめの変動値となっている。

2.3.3 走行時における受信品質

走行実験は、茨城県鹿嶋市内、国道 51 号線（鹿嶋市-水戸市間）及び千葉市幕張地区にて実施した。

鹿嶋市は、主に低層の建物及び樹木等によって衛星からの S 帯ダウンリンク信号に減衰あるいは遮断が発生する場所が点在するような郊外地である。市内の一般道路を約 6km 走行し、OFDM 信号の受信電力及び誤り訂正無し BER を取得した。図 8 は、受信 C/No 及び BER の走行時の一例である。グラフの右側の受信レベルが急激に低くなっている箇所は、障害物によるブロッキング及びシャドウイングによるものである。また衛星が見通せる状態でのレベル変動は 3dB 程度であった。図 9 は受信信号の C/No 及び BER の累積確率分布である。確率は全走行距離（約 6km）に対する確率を示している。

図 9 (1) では C/No が約 72.5dBHz のところでグラフの傾きが変化しており、72.5dBHz 以上は衛星が見通し状態、それ以下はシャドウイング等によって受信信

号が減衰する走行環境と考えられる。一方、見通し状態での C/No の値は、72.5dBHz から 75.5dBHz と、変動幅は約 3dB 有り、停止時のレベル変動幅である 1dB より大きな値となっており、走行によって受信信号レベルが変動していることが統計的な数値からも読み取れる。図 9 (2) の BER の累積確率分布では、横軸が BER、縦軸は取得した BER が横軸の値を上回る確率である。

受信信号の C/No が 72.5dBHz 以下となる確率は約 10%、BER の累積確率で 10% となる BER の値は約 1×10^{-2} となり、図 6 に示す移動受信局の BER 特性と良く合っている。また、C/No が 74dBHz 以下となる確率は約 80%、BER の累積確率で 80% となる BER の値は約 2×10^{-3} となり、これも、図 6 に示す移動受信局の BER 特性と良く合っている。一方、C/No が約

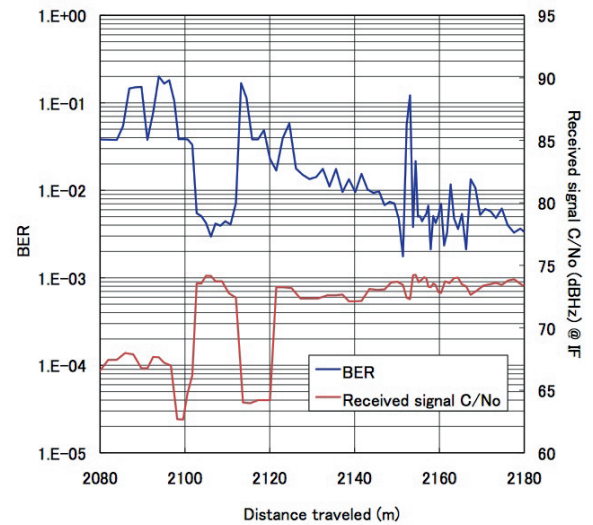
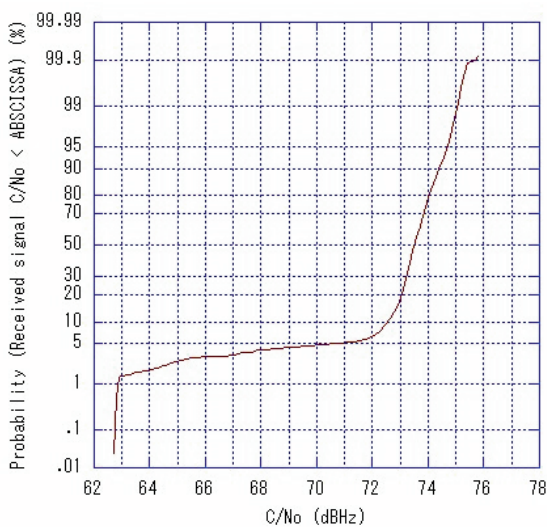
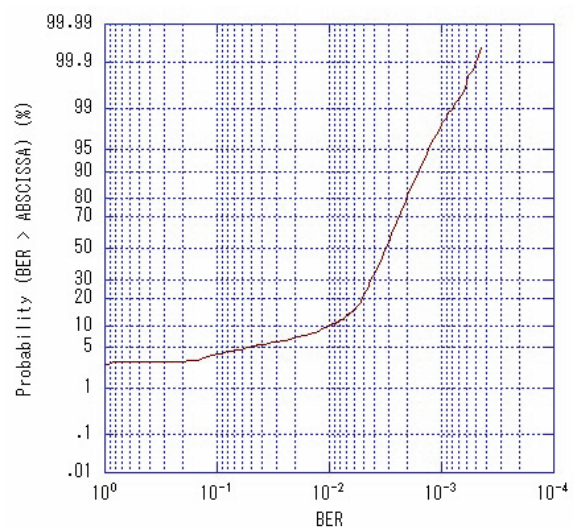


図 8 鹿嶋市内走行時の BER の変動 (OFDM)



(1) 受信信号の C/No



(2) BER (誤り訂正無し)

図 9 走行時の受信信号の C/No 及び BER の累積確率分布 (鹿嶋市内)

3 移動体衛星通信システム実験

72.5dBHz 以下は、主にシャドウイングが原因のレベル低下であることから、測定される信号レベルは主に測定系の雑音レベル付近の値で、BER 値としては、0.1 以上がそのほとんどを占めている。これらの結果から、衛星を見通せる環境であれば、移動中においても、静止状態での受信性能とほぼ同じ性能が得られていることが確かめられた。

図10には図8のデータを取得した場合と同じ道路を走行し、QPSK における伝送特性を取得したデータを示してある。図の BER の変化で、赤線の丸で示したところでビット誤りが多く現れている。しかしながら、受信 C/No 値には大きな変動がない。走行した道路の該当の箇所では、中層のマンションが車両の右側に建っており、一方、衛星からのダウンリンク信号は車両の左側仰角約 50° 方向から到来していることから、建物で反射した遅延波の影響と考えられる。さらに、受信 C/No 値に大きな変動がないことから、信号帯域の一部のみの信号レベルが変化する周波数選択性フェージングが生じていると推測される。

一方、図8の OFDM 信号の場合では、BER の急激な劣化は生じていない。これは、OFDM はマルチキャリア方式のため、遅延波を受信したときに発生する周波数選択性フェージングの影響を受けにくく、また、OFDM シンボルにはガードインターバルが設けられているため、シンボル間干渉も受けにくいという特徴があることによるものと考えられる。

鹿嶋市内の走行実験では、道路事情から、反射波による影響の詳細を調べることは困難なため、高層ビルが乱立する千葉市幕張地区において、走行実験を行なって、データを取得した。

実験を行った幕張新都心は、JR 京葉線の海浜幕張駅に隣接する狭い区画に約 10 棟の 30 階程度の比較的高

いビルが点在する走行環境である。片側 2～3 車線の比較的広い道路と一方通行の狭い道路が混在しており、道路を跨ぐ歩道橋及び鉄道の高架橋等で衛星からのダウンリンク信号が遮断されるところが多い。図11に実験を行った幕張新都心の写真を示す。

幕張地区での走行実験においては、衛星からの直接波と、高層ビルからの反射波が同時に受信できるような地点で、受信信号のスペクトラムを計測した。OFDM 信号における受信スペクトラムを図12に示す。図に示すように、占有周波数帯域の低い周波数部分でレベルの低下が見られ、周波数帯の一部のみのレベルが低下する周波数選択性フェージングが生じている様子がわかる。



図 11 幕張新都心の走行環境

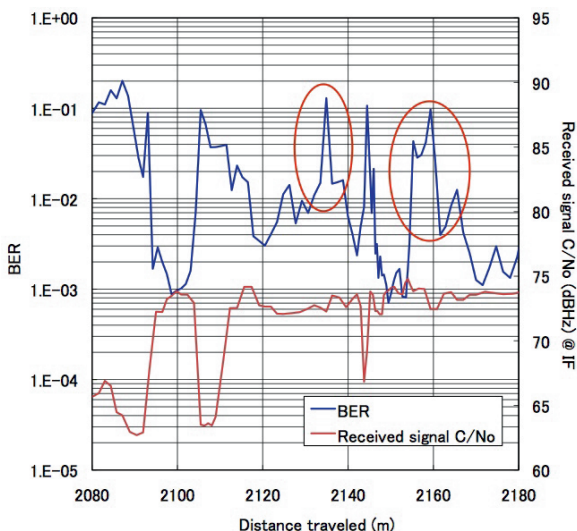


図 10 鹿嶋市内走行時の BER の変動 (QPSK)

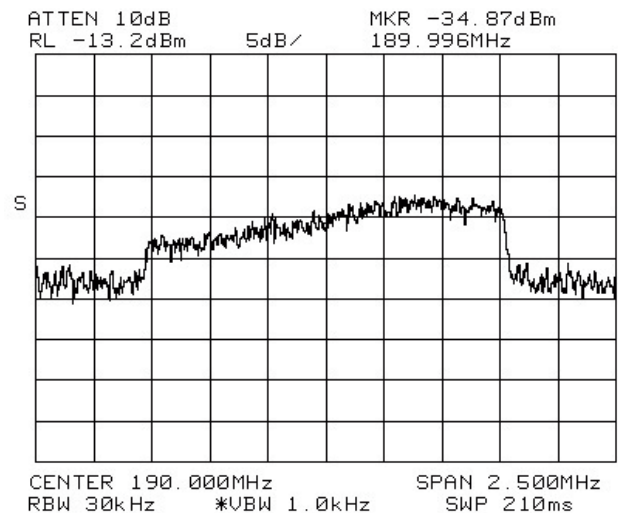


図 12 遅延波による受信信号のスペクトラム歪み

走行環境を勘案すると、この信号受信時には、直接波と1波の反射波を同時に受信している可能性が高いことから、フェージングシミュレータを用いて、直接波と反射波のパラメータを推定した。図13にシミュレータにより再現したOFDM信号のスペクトルを示す。直接波と反射波の電力比であるD/Uは6dB、また、反射波の直接波に対する遅延時間は0.3μsecとした。遅延時間については、走行したときの車両と高層ビルの位置関係並びに衛星からの電波の到来方向から幾何学的に計算することが可能で、高さが100m程度のビルで計算した結果、遅延時間は約0.08μsecから0.32μsecが得られた。また、ビルの壁面からの反射率

は、以下のフレネルの反射係数の式から求めた。

$$r_H = \frac{\cos\theta_i - (\epsilon_r - \sin^2\theta_i)^{1/2}}{\cos\theta_i + (\epsilon_r - \sin^2\theta_i)^{1/2}}$$

$$r_V = \frac{\epsilon_r \cos\theta_i - (\epsilon_r - \sin^2\theta_i)^{1/2}}{\epsilon_r \cos\theta_i + (\epsilon_r - \sin^2\theta_i)^{1/2}}$$

ここで、 r_H は入射面に対して水平な偏波の反射係数、 r_V は入射面に対して垂直な偏波の反射係数である。また、 ϵ_r は壁面の材質の比誘電率、 θ_i は壁面への入射角である。

壁面の材質をコンクリートとすると ϵ_r は6.7、ビルの壁面への電波の入射角は、衛星の仰角を48°、地図情報からビルの壁面の法線方向と衛星方向の方位角方向の角度差を約45°として計算すると約61.7°となる。

計算の結果、電波の入射面に水平な偏波の反射係数は約-0.65、垂直な偏波では約+0.15が得られ、反射波の強度は直接波に対して約4dB低下したものとなる。水平な偏波の反射係数はマイナスの符号となっているが、これは振幅の位相が180°変化することを示しており、ビルからの反射波は直接波の左旋円偏波に対して逆旋となる。これらのパラメータ値により、走行実験で取得されたスペクトラムを再現したとき、反射波の強度を直接波に対して-6dBとすると、信号の帯域内のレベル変化の大きさが合う。

図14に、D/U=6dBにおける遅延時間をパラメータにした場合のBER特性を示す。

図14(1)は、OFDM信号の場合、また、比較のため、図14(2)には、QPSK信号で同様に測定した特

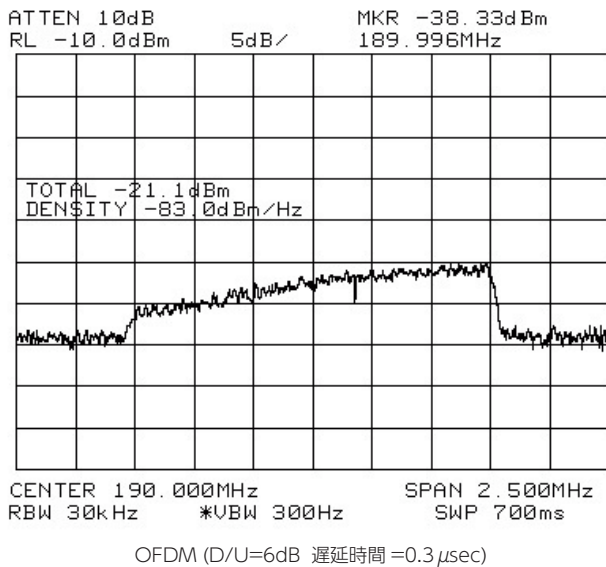
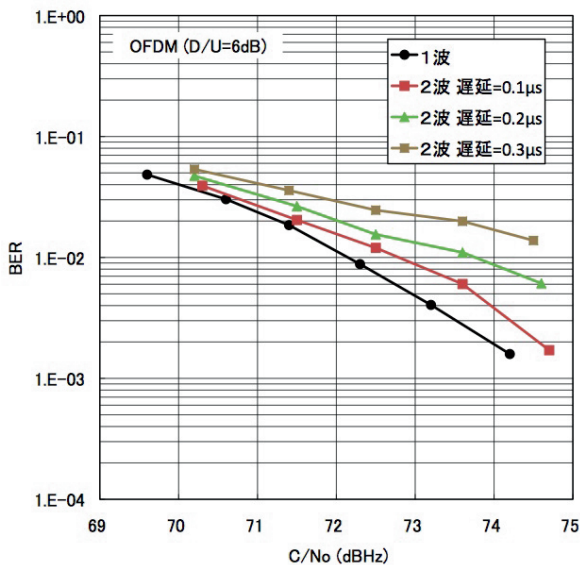
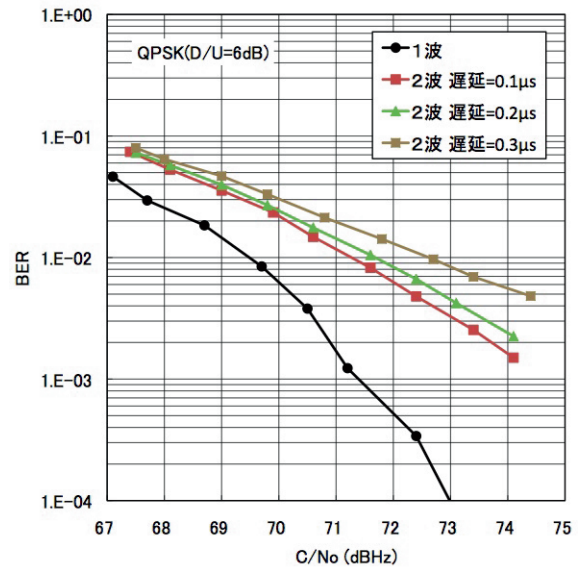


図13 遅延波による受信信号のスペクトラム歪み (シミュレーション)



(1) OFDM (D/U=6dB)



(2) QPSK (D/U=6dB)

図14 遅延波を重畳したときのBER特性 (シミュレーション、誤り訂正無し)

性を示している。

図 14 (1) より BER が 2.5×10^{-2} において 1 波のときに対して、 $0.1 \mu\text{sec}$ の遅延波を重畳させたときでは約 0.2dB、 $0.3 \mu\text{sec}$ の遅延波を重畳させたときでは約 1.5dB 劣化することが分かる。遅延時間により BER の特性に変化が生じるのは、信号の占有帯域の上側と下側の搬送波周波数で波長が異なるため、遅延時間が長くなるほど、すなわち伝送路が長くなるほど占有帯域の上側と下側で遅延波の位相が変化し、周波数選択性フェージングによる占有帯域内の信号レベルの変化が大きくなるのが理由である。

また、QPSK の場合は、BER が 2.5×10^{-2} において 1 波のときに対する劣化は、 $0.1 \mu\text{sec}$ の遅延波を重畳させたときでは約 1.7dB、 $0.3 \mu\text{sec}$ の遅延波を重畳させたときでは約 2.5dB となり、OFDM と比較して劣化が大きいことが分かる。

3 おわりに

ETS-Ⅷを用いて OFDM 信号による同報通信実験を行った。

衛星回線を含む伝送路に非線形特性を有する場合の伝送特性への影響について、伝送路が線形の領域から非線形の領域で BER 特性を取得し、非線形特性により BER 特性が劣化することを確認した。

走行実験では、郊外の小規模な市街地、郊外の道路、ビル街及び高速道路を走行し、受信信号レベル並びに BER を取得した。郊外の小規模な市街地及び郊外の道路は、建物やシャドウイングなどによる信号の減衰の発生が少なく、衛星が見通し状態であれば、受信信号の C/No が約 73dBHz、BER は 1×10^{-2} 程度が確保でき、高品質な情報の受信が可能であることを確認した。また、市街地では OFDM と QPSK でビット誤りの発生状況を取得したデータで比較し、建物からの反射等による遅延波による影響とみられるビット誤りが、OFDM では発生しにくいことを確認した。

ビル街は、建物からの反射等による遅延波が多く受信される走行環境と考えられるが、走行実験で取得した C/No 及び BER の累積確率分布からは、OFDM と QPSK で顕著な差異はみられないものの、建物からの反射等による遅延波の干渉による受信信号のスペクトラムの歪みが観測され、周波数選択性フェージングが発生しやすい走行環境であることを確認した。この遅延波による影響については、シミュレータを用いてスペクトラムの歪み及び遅延波の遅延時間をパラメータとして BER 特性を取得し、その結果から、 $0.1 \mu\text{sec}$ から $0.3 \mu\text{sec}$ までの遅延波を直接波に重畳させたとき、OFDM では BER が 2.5×10^{-2} の点において 1 波のとき

に対して約 1.5dB 程度までの劣化であるが、QPSK では約 2.5dB 程度までの劣化となり、遅延波による影響は OFDM の方が受けにくいことを示した。

以上の結果から、OFDM は遅延波による影響を受けにくく、衛星が見通し状態であれば、高品質な情報の受信が可能であり、QPSK と比較して移動環境の同報通信に適していることを、衛星を使った通信実験により実証した。

【参考文献】

- 1 European Telecommunication Standard ETS 300 401 Second Edition, May 1997.
- 2 Rec. BS.1114-5, "Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3000 MHz," April 2002.



山本伸一 (やまもと しんいち)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
移動体衛星通信



川崎和義 (かわさき かずよし)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
衛星通信

佐藤正樹 (さとう まさき)

産学連携部門連携研究推進室マネージャー
衛星通信、アンテナ