
米国地上デジタルTV用移動受信機

Mobile Receiver for Legacy ATSC

岩井 智昭, 林 幸雄, 阿部 義徳
Tomoaki Iwai, Yukio Hayashi, Yoshinori Abe

要旨 ATSC方式は米国, カナダ, メキシコ, 韓国で採用されている地上デジタル放送規格である。これまで, このATSC信号の移動受信は不可能だとされてきた。実際, 1998年の放送開始以来, 移動受信可能な受信機は存在してこなかった。しかしながら, 我々はATSC用の移動受信機の開発に成功した。開発したプロトタイプ受信機は時速200kmの高速移動環境においても無誤り受信可能である。米国ロサンゼルスで実施されたフィールド実験での総合受信率は98%以上であり, 本技術の実製品への応用がすぐにでも可能であることが示された。フィールド実験では, 受信RF信号のキャプチャも行った。キャプチャデータを用いた解析の結果, 十分なタップ長の伝送路推定器を用いた4ダイバーシティ受信機は, 誤り発生がマルチパスの影響を受けることなく受信電力のみで決定される, いわば準理想的な受信性能を実現できることが確認された。また, 実フィールドでは512シンボルを越える長遅延のマルチパス成分がしばしば存在することが確認された。

Summary Despite the common perception that mobile reception of the legacy ATSC signal is nearly impossible, we have succeeded in developing a mobile receiver prototype for the legacy ATSC. Laboratory testing has shown that the prototype works well at speeds over 200 km/h. In this paper, we present the results of a field evaluation conducted in the Los Angeles area. The prototype delivered quasi-error-free video and audio in almost all areas around Los Angeles, and achieved a total reception rate of over 98% to show that the developed technology is immediately applicable to consumer products. After the field evaluation, various analyses were made on the captured data. The results show that the 4-diversity receiver with sufficient estimator tap length can achieve nearly ideal reception where error occurrence is mostly determined by total reception power with little regard to multipath configuration. Delay profile analysis shows that delay spread of the actual field is sometimes wider than 50 microseconds, requiring a channel estimator over 512 taps.

キーワード : ATSC, DTV, 8VSB, 周波数領域等化, ダイバーシティ受信, 移動受信機

1. はじめに

ATSC方式⁽¹⁾は米国, カナダ, メキシコ, 韓国で採用されている地上デジタル放送規格である。同方式は, 8VSB変調と呼ばれるシングルキャリア変調方式を用いており, マルチキャリア変調方式を用いている日本のISDB-T方式, 欧州のDVB-T方式 など⁽²⁻⁴⁾と比較して, マルチパス妨害耐性に劣ることが指摘されてきた。特に, 動的マルチパス耐性は低く, これまで車での移動受信が可能な受信機は存在してこなかった。

高まる移動受信への要求に応えるべく, 米国では2009年より, ATSC-M/H方式⁽⁵⁾による放送サービスが新たに開始されている。M/H方式は高い動的マルチパス耐性を有しており, 車載受信も容易である。しかし

ながらM/H方式の画像品質は従来のATSC方式に比較して低いものであり, 放送サービスもまだまだ少ないのが現状である。

この度, 我々は, これまで不可能とされてきた従来型ATSC放送の移動受信に成功した。開発したプロトタイプ受信機は, 200km/hの高速移動環境下においても, 無誤り受信可能である。また, 開発プロトタイプは, 米国各都市で実施されたフィールド実験において, 97%以上という高い受信率を記録している。

本報告では, まず2章において, プロトタイプに実装された受信アルゴリズムの特徴について述べる。続く3章ではプロトタイプの構成概要と実験室評価の結果を紹介する。4章ではロサンゼルス周辺で実施し

たフィールド実験の結果について報告する。5章ではキャプチャデータを利用した様々な解析の結果を紹介する。6章では、本報告をまとめる。

2. 受信アルゴリズムの概要

プロトタイプは周波数領域等化技術⁽⁶⁾およびダイバーシティ受信技術の応用により実現されている。プロトタイプの信号処理フローを図1に示す。プロトタイプでは、周波数領域信号処理が多用されており、その構成は、時間領域信号処理を用いた従来のシングルキャリア用受信機よりも、むしろマルチキャリア(OFDM)用の受信機に近い。

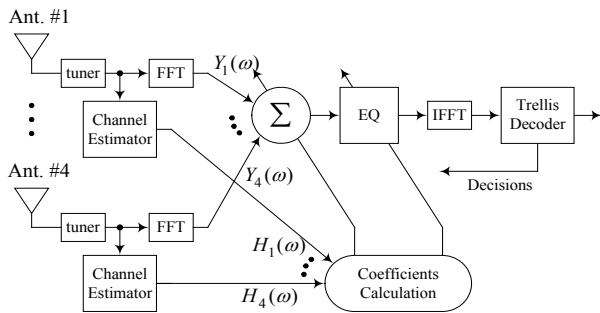


図1 プロトタイプの信号処理フロー

プロトタイプに搭載されている受信アルゴリズムの特徴としては、以下の3点が挙げられる。

2.1 ダイバーシティ受信

図1に示されるように、プロトタイプは4つのアンテナブランチを有するダイバーシティ受信機として構成されている。ダイバーシティ受信は複数のアンテナからの信号を合成することで受信性能を向上させるものであり、厳しいマルチパス妨害に対する最も効果的な対策のひとつである。

2.2 周波数領域合成等化

図1に示されるように、受信信号は高速フーリエ変換(FFT)により周波数領域に変換される。各アンテナブランチのFFT出力は最適な合成係数を乗算された後で合成される。ここで、合成係数は、合成後のSNRが最大となるように、周波数ビン毎に最適化される。周波数領域ダイバーシティ合成により、マルチパス妨害の影響は大幅に低減される。また、演算量削減の観点から、等化処理も周波数領域で実施される。

2.3 伝送路推定

これまでのATSC受信機では、等化係数を直接的に最適化する、いわゆる適応等化技術⁽⁷⁾が広く用いられ

てきた。これに対し、今回のプロトタイプは、伝送路推定技術に基づいて構成されている。ブランチごとに用意された伝送路推定器は、各アンテナに対応する受信信号とトレリス復号器からの送出シンボル推定に基づいて、当該ブランチの伝送路インパルス応答(CIR)を推定する。このCIR推定は、時間領域において、LMSアルゴリズムに基づいて行われる。ダイバーシティ合成係数および等化係数は、こうして推定されたCIRに基づいて解析的に算出される。このように、伝送路推定処理を係数最適化処理と分離することにより、移動受信において要求される高速な伝送路追従性能が実現されている。

3. プロトタイプ

3.1 プロトタイプの構成

プロトタイプの構成を図2に示す。プロトタイプはフロントエンドユニットとコアユニットで構成されている。

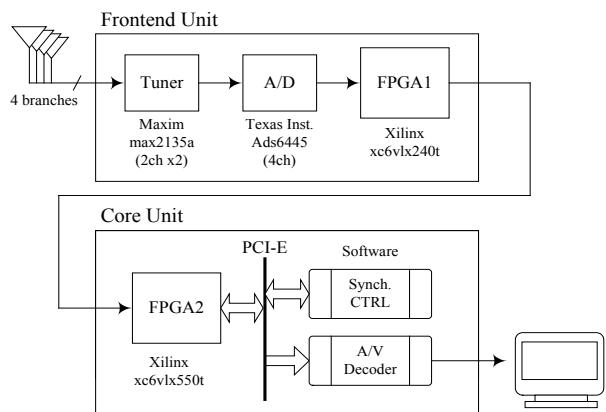


図2 プロトタイプの構成

フロントエンドユニットは、受信したUHF帯の信号をIF信号に変換するシリコンチューナーと、IF信号をサンプリングするAD変換器と、AD変換器出力を複素基底域系列へ変換する第一のFPGAで構成されている。この第一のFPGAはチャンネルフィルタリング、基底域への周波数変換、ATSCシンボルレートへの再標本化などの機能を実現している。

得られた複素基底域系列はコアユニットに供給される。コアユニットは市販PCベースで構成され、PCI-Eバス上にFPGAボードが実装されている。定常復調過程は、このFPGAボード上の第二のFPGAによって実現されている。ここで、定常復調過程は、FFT、逆FFT、伝送路推定、ダイバーシティ合成、等化、トレリス復号、リードソロモン復号などを含むものである。なお、プロトタイプにおいて、伝送路推定器のタップ長は512シンボルとなっている。

復調で得られたMPEG-TSのAVデコードおよび、初期復調過程はPCソフトウェアにより実現されている。

また、コアユニットは受信した各ブランチの複素基底域系列をハードディスクへ記録することが可能である。こうして得られるキャプチャデータは、実フィールド環境の解析、あるいは更なる受信性能の向上に利用される。

3.2 実験室評価

ここでは、プロトタイプの実験室で評価した結果を紹介する。評価は、ATSC変調器とフェージングシミュレータを用いて行われた。レイリーフェージング伝送路におけるセグメント誤り率(SER)特性を図3に示す。入力RF信号の変調周波数は551MHz、電力は-40dBmとしている。伝送路モデルとしてはTU-6⁽⁸⁾を使用している。図3のグラフからわかるように、プロトタイプは200km/hの高速移動環境下においても無誤り受信が可能である。

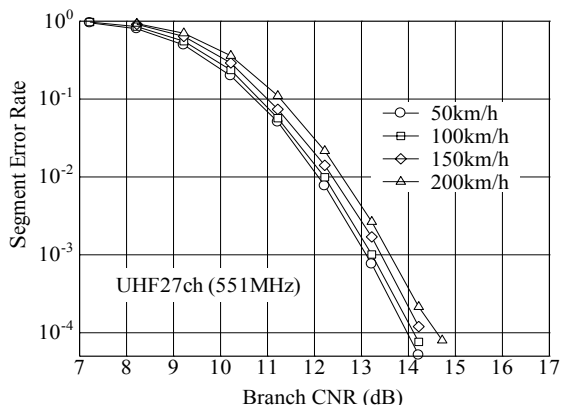


図3 プロトタイプSER性能 (GSM/TU6 Rayleigh fading channel)

4. フィールド実験

我々は、開発技術の実用性の確認を目的として、米国の各都市（サンフランシスコ、ロサンゼルス、シカゴなど）でフィールド実験を実施してきた。ここでは、2012年1月にロサンゼルス周辺で実施したフィールド実験の概要と結果を紹介する。

4.1 システム概要

フィールド実験に使用したシステムを図4に示す。テスト車両には、図5に示すモーターホームを使用した。

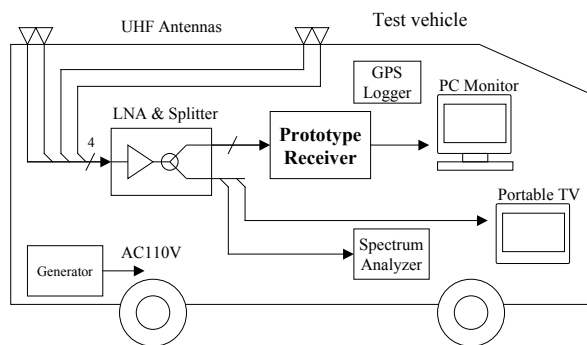


図4 評価システム

図6に示すように、テスト車両の屋根には4つのロッドアンテナが設置されている。なお、各アンテナは、ダイバーシティ効果が得られるように、UHF帯の波長に比較して十分に長い距離をおいて配置されている。アンテナからの出力信号はRF分配器を介してプロトタイプと比較用の市販ポータブル受信機の双方へ供給されている。



図5 テスト車両



図6 アンテナ配置

プロトタイプ評価はロサンゼルス周辺の延べ660kmのコース上で約19時間をかけて行われた。評価コースを図7で示される地図上に青（太）線で示す。ここで、説明の都合上、全体コースをオレンジ

リーウェイを境に西区域と東区域に分ける。西区域にはロサンゼルス周辺の主要な都市や街（LAダウンタウン、ハリウッド、サンタモニカ、パサデナ、ロングビーチ、アナハイム等）が多く含まれる。一方、東区域は比較的郊外であり、送信塔が丘陵などにより見通せない、いわゆるNLOS（non-line-of-sight）地点を多く含んでいる。

テスト車両の走行速度分布を図8に示す。プロトタイプ評価は、信号待ちで停車中、一般道を走行中、フリーウェイを高速で走行中など様々な移動速度条件の中で実施された。

受信チャンネルは表1に示す中から満遍なく選択した。これらの放送サービスは全てMt. Willsonにある送信塔（図7参照）から送信されている。

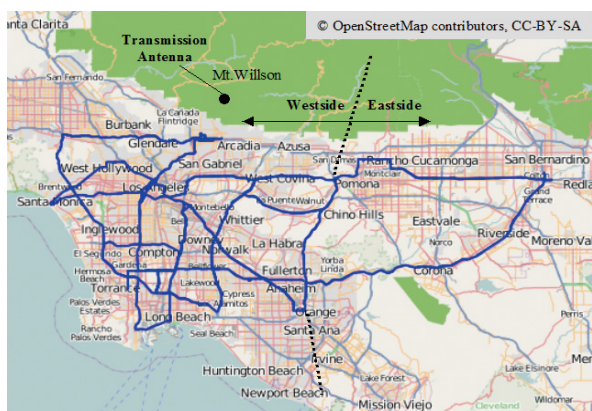


図7 評価コース

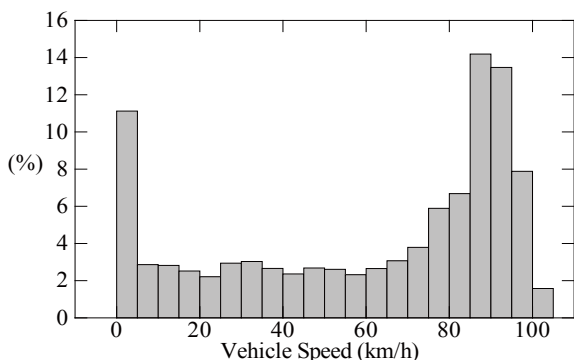


図8 テスト車両速度分布

表1 受信チャンネル

Call sign	CH	Network	Call sign	CH	Network
KSCI	U18	IND	KNBC	U36	NBC
KBEH	U24	MTV TR3S	KPXN	U38	ION
KVCR	U26	PBS	KVEA	U39	NBC
KCET	U28	PBS	KLCS	U41	PBS
KFTR	U29	TELEF.	KWHY	U42	NBC
KTLA	U31	CW	KCBS	U43	CBS
KDOC	U32	IND	KAZA	U47	AZTECA
KTBN	U33	TBN	KOCE	U48	PBS
KMEX	U34	UNIV.	KJLA	U49	IND
KRCA	U35	IND	KXLA	U51	IND

4.2 受信率

実験では、受信された総てのMPEG-TSP（MPEG - transport stream packet）について、パケット誤りを観測した。セグメント誤り率（SER）および、セグメント受信率（SRR）は、こうして得られたパケット誤り情報から算出している。

実験で得られた受信率を表2に示す。ロサンゼルス地域全体での受信率は98.7%と高いものであり、開発技術が実製品に十分に適用可能であることを示している。なお、西区域での受信率は99.8%と非常に高く、ほとんどの誤りは東区域で観測されている。この差の原因については5章で後述する。

表2 プロトタイプ受信率
（ロサンゼルス地域）

Area	Total TSP	Period	Error TSP	SRR
Westside	692223792	14:51:53	1315225	99.81%
Eastside	176166744	3:46:58	9713334	94.49%
Total	868390536	18:38:52	11028559	98.73%

4.3 性能比較

ここでは、プロトタイプと市販のポータブル受信機との性能比較実験の結果を紹介する。比較実験はロングビーチ（送信塔から40~50km）で行い、受信チャンネルはUHF36chである。市販受信機ではパケットエラー情報が取得できないため、それぞれの受信機の出力映像を主観手法で比較した。具体的には、出力映像を観測者がモニターし、1秒毎の映像エラー生起を記録した。比較結果を表3に示す。市販のポータブル受信機は移動受信環境では、ほとんど正常な受信ができないことがわかる。また、停止時においてもしばしばエラーが観測されている。一方、プロトタイプは約27分間に渡って、無誤り受信を達成している。

表3 受信機性能比較結果

Condition	Total Period	Period with error	
		Prototype	Conventional
Moving	1105 sec	0 sec (0%)	982 sec (88.9%)
Stopped	523sec	0sec (0%)	81sec (15.5%)

5. キャプチャデータによる解析

前述したとおり、プロトタイプは受信した複素基底域系列をハードディスクに記録可能である。ロサンゼルスでのフィールド実験では、約170分のデータを記録した。また、引き続いて行われたサンディエゴでのフィールド実験では約20分のデータを記録した（表4参照）。なお、データ記録については、複素基底域信号に付随する形で、GPS位置情報および各アンテナの

受信電力についても行った。実際のフィールド実験の後、これらのキャプチャデータを用いて様々な解析を行った。ここでは、これらの解析の結果を紹介する。

表4 キャプチャデータ

Area	Number of files/locations	Total time (sec)
Westside	142	9136
Eastside	22	1161
L.A. total	164	10297
San Diego	31	1311

5.1 伝送路推定器のタップ長

伝送路推定器のタップ長は受信性能を決める重要なパラメータである。ここでは、異なるタップ長における受信性能を比較検討した結果を紹介する。検討にはプロトタイプと同等の処理を行うソフトウェア（SW）復調器を使用した。SW復調器では、推定器のタップ長を自由に設定することが可能である。異なるタップ長に設定したSW復調器によりキャプチャデータを復調した結果を比較することにより、実フィールドで要求されるタップ長を確定することが可能である。

ロサンゼルス地域のキャプチャデータ群についての復調結果を表5に示す。タップ長512（プロトタイプと同等）の推定器を用いた場合、東区域の誤り率は6.2%であり、西区域より大幅に悪い結果となっている。一方、タップ長を768まで拡張した場合には、東区域の誤り率は0.25%と大きく改善されている。同様な性能改善は、表6に示すように、サンディエゴ地域のキャプチャデータに対しても見ることができる。ここでタップ長を768に拡張した場合に得られる改善量はロサンゼルス東区域の場合よりも大きく、誤り率は14.08%から0.05%へと大幅に改善されている。一方、タップ長を1024まで拡張しても、改善はほとんど見られない。この結果から、これらの地域のマルチパス遅延広がり512から768シンボルの範囲にあると考えられる。なお、これらの地域の遅延プロファイルについては後述する。

表5 伝送路推定器のタップ長による誤り率の比較
(ロサンゼルス地域, 4ダイバーシティ構成)

Area	Total TSP	Segment error rate (SER)		
		512 taps	768 taps	1024 taps
Westside	117550368	0.94 %	0.70 %	0.60 %
Eastside	14907048	6.20 %	0.25 %	0.20 %
Total	132457416	1.53 %	0.65 %	0.55 %

表6 伝送路推定器のタップ長による誤り率の比較
(サンディエゴ地域, 4ダイバーシティ構成)

Area	Total TSP	Segment error rate (SER)		
		512 taps	768 taps	1024 taps
San Diego	16845504	14.08 %	0.05 %	0.05 %

5.2 ダイバーシティ系統数

続いて、ダイバーシティ系統数、すなわちアンテナ本数の違いによる性能の変化を評価する。表7はロサンゼルス地域のキャプチャデータを4ダイバーシティ構成および2ダイバーシティ構成のSW復調器で復調した場合の誤り率を比較したものである。なお、伝送路推定器のタップ長は768タップとしている。結果からは、2ダイバーシティの性能が、4ダイバーシティに較べて劣っていることがわかる。しかしながら、2ダイバーシティでも実用に耐えないというレベルではないこともわかる。

表7 ダイバーシティ系統数での誤り率比較
(ロサンゼルス地域, タップ長768)

Area	Total TSP	Segment error rate	
		4dvr	2dvr
Westside	117550368	0.70 %	3.19 %
Eastside	14907048	0.25 %	5.17 %
Total	132457416	0.65 %	3.41 %

5.3 遅延プロファイル解析

ここでは、ロサンゼルス地域とサンディエゴ地域のいくつかの地点で観測された伝送路遅延プロファイルを紹介する。これらの遅延プロファイルはキャプチャデータとして記録された受信複素基底域系列と、これをSW復調して得られた送信シンボル推定系列とから算出されたものである。

図9はロサンゼルスのChinatownで観測された遅延プロファイルである。この遅延プロファイルからは、直接波による主マルチパス成分を容易に認識することができる。ロサンゼルスの西区域では同様な遅延プロファイルが多く観測される。図10はハリウッドのChinese Theatre付近、図11はLAダウンタウンのSouth Grand Avenue付近での遅延プロファイルである。これらの遅延プロファイルの全てにおいて、マルチパス成分は512シンボルまでの遅延範囲に集中している。このため、ロサンゼルス西区域では、タップ長が512の場合であっても高い受信率を得ることが可能であったと考えられる。

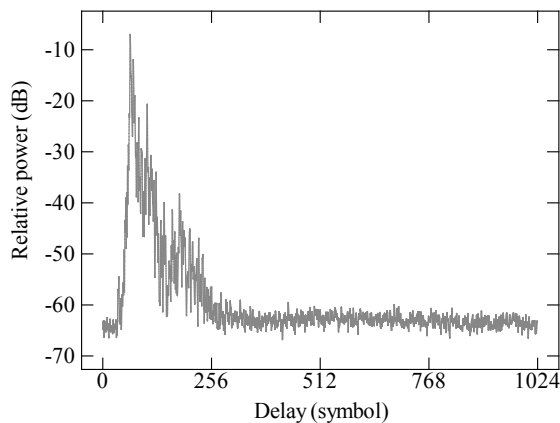


図9 Delay profile (Chinatown, U43)

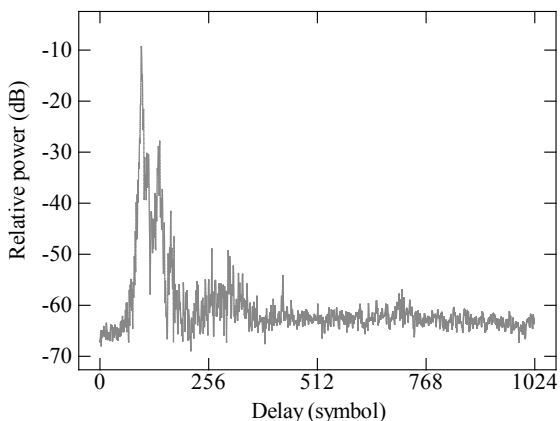


図10 Delay profile (Hollywood, U28)

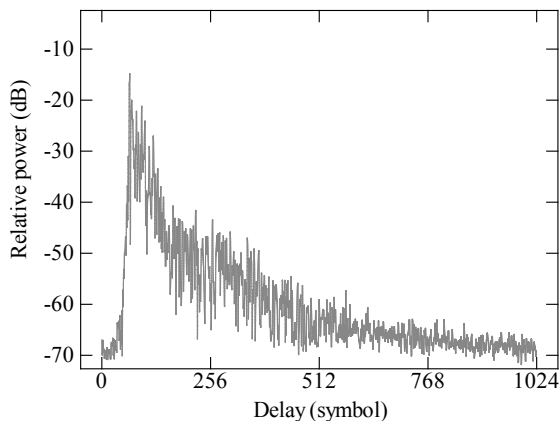


図11 Delay profile (downtown L.A., U43)

以上に紹介したロサンゼルス西区域の比較的シンプルな遅延プロファイルとは対照的に、ロサンゼルス東区域あるいはサンディエゴにおいては、遅延広がり大きい複雑な遅延プロファイルが観測された。図12はポモナのRoute 10 (San Bernardino Freeway)とOrange Freewayのジャンクション付近で観測された遅延プロファイルである。この地点では送信塔からの直接波は山によって完全に遮られている。この遅延プ

ロファイルでは、西区域の場合のように直接波成分を認識することは困難である。また、マルチパス成分は512シンボルを超えた遅延範囲まで広がっている。こうした地点が多く含まれるため、ロサンゼルス東区域では、タップ長を768に拡張することにより大きな性能改善がみられたと考えられる。

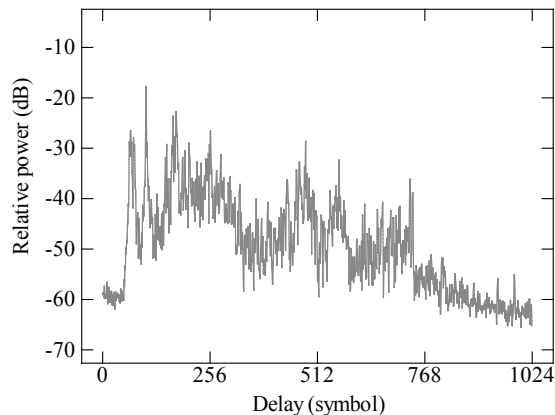


図12 Delay profile (Pomona, U24)

図13はサンディエゴのWest Ash Streetインターセクション付近のNorth Harbor Driveで観測された遅延プロファイルである。この地点では、多くのビルによって送信塔からの直接波が遮られている。この遅延プロファイルでは、直接波成分はかろうじて認識できる程度であり、マルチパス成分は広い遅延範囲に分散して分布している。

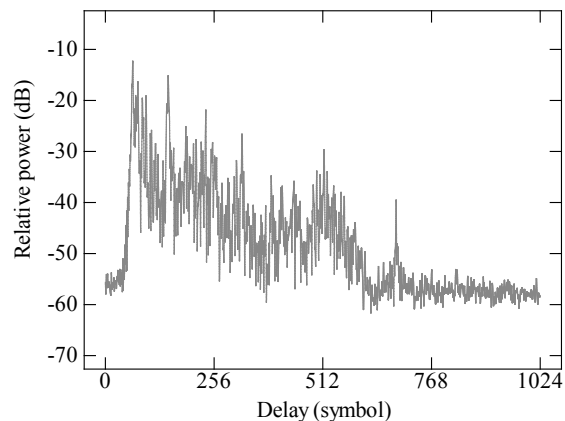


図13 Delay profile (San Diego, U30)

5.4 受信電力 vs. 受信率

ここでは、受信電力と受信率の相関関係を紹介する。ここで受信電力はATSCフィールド毎の全ブランチの総合平均受信電力であり、受信率はタップ長768に設定されたSW復調器のATSCフィールド毎のセグメント受信率である。また、対象キャプチャデータはロサンゼルス地区のものである。

図14に2ダイバーシティの場合の結果を示す。グラフからは、全誤り状態から、無誤り状態への遷移が鈍く、かつ滑らかではないことが見て取れる。これは受信電力が十分に高い場合であっても、マルチパス妨害により誤りが発生していることを意味している。一方、図15に示される4ダイバーシティ構成の場合には、状態遷移は急峻かつ滑らかであることが見て取れる。これは4ダイバーシティ受信機がマルチパスの影響を殆ど受けず、その受信特性がほぼ受信電力のみで決定されることを意味している。すなわち、この4ダイバーシティ受信機は、準理想的な受信性能を実現していることがわかる。

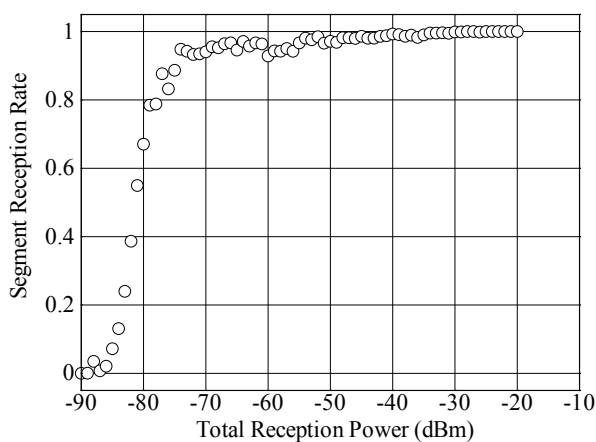


図14 受信率対受信電力
(2-diversity, 768 taps)

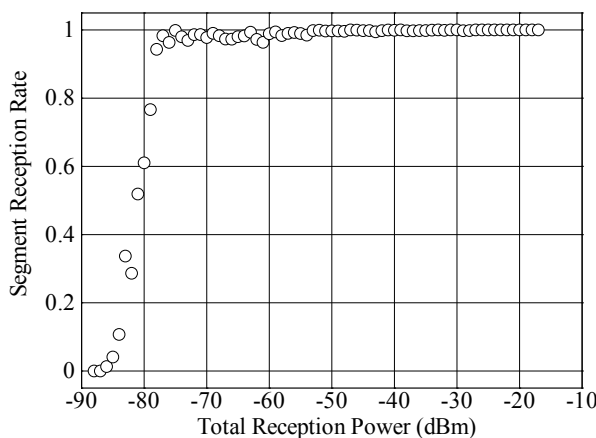


図15 受信率 vs. 受信電力
(4-diversity, 768 taps)

受信率は98.7%であり、開発技術がすぐにも実用化できるレベルにあることが確認された。

実フィールド実験の後、キャプチャデータを用いた様々な解析が行われた。これらの解析により、伝送路推定器のタップ長が十分に長い4ダイバーシティ受信機は、マルチパス妨害の影響を受けることなく、誤り生起が受信電力のみ決定される、いわば準理想的な受信性能を実現できることが示された。また、伝送路推定器のタップ長を768に拡張することで、ロサンゼルス地域での受信率を99.4%まで高められることが確認された。更に、遅延プロファイル解析により、実フィールドの遅延広がりが512シンボルを超える場合が少なくないことが確認された。

今後は、車載製品のみならず、携帯製品（携帯電話、タブレット等）への本技術の応用をも視野に入れて技術開発を行っていく。また更なる性能向上を目指し、アルゴリズムの改良を行い、高性能移動受信機製品へ向けた開発を進めていく予定である。

6. まとめ

ATSC用の移動受信機プロトタイプを実フィールドにおいて評価した。プロトタイプはロサンゼルス周辺の全域において、ほぼ誤りのない受信を達成した。総合

参 考 文 献

- (1) ATSC digital television standard, ATSC: A/53, Advanced Television Systems Committee, Washington, D.C., August 2009.
- (2) VSB/COFDM Project, 8VSB/COFDM Comparison Report, December 2000.
- (3) FACTS, FACTS Summary Report for the Australian Field Trials of DVB-T and ATSC DTTB Systems Conducted in 1997, July 1998.
- (4) ABERT/SET, VSB/COFDM Comparison Report, May 2000.
- (5) ATSC-Mobile DTV Standard, ATSC: A/153, Advanced Television Systems Committee, Washington, D.C., October 2009.
- (6) D.Falconer, S.Ariyavisitakul, A.Benjamin-Seeyar and B.Eidson, "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems", IEEE Comm. Mag., Vol. 4, No. 4, April 2002.
- (7) DTV Signal Reception and Processing Considerations, ATSC: T3-600r4, Advanced Television Systems Committee, Washington, D.C., September 2003.
- (8) COST 207 Management Committee, "COST 207: digital land mobile radio communications," Commission of the European Communities, Luxembourg 1989.

筆 者 紹 介

岩井 智昭 (いわい ともあき)

研究開発部第8研究部 所属。
プロジェクションテレビの開発・設計, 国内デジタル放送受信機の研究・開発を経て, 現在ATSC車載受信技術の研究に従事。

林 幸雄 (はやし ゆきお)

研究開発部第8研究部 所属。
MPEG2, MPEG4のエラーコンシールメント技術の研究・開発, ISDB-T移動受信技術の研究・開発を経て, 現在ATSC車載受信技術の研究に従事。

阿部 義徳 (あべ よしのり)

研究開発部第8研究部 所属。
CATVシステムの研究開発, ATSC復調LSIの開発, ISDB-T移動受信技術の研究・開発を経て, 現在ATSC車載受信技術の研究に従事。