

# 時空間符号化を適用した SFN 方式の伝送特性評価 —SFN 環境で取得した伝搬路応答を用いた評価—

佐藤 明彦 薮 拓也 竹内 知明 岡野 正寛 土田 健一

NHK 放送技術研究所 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

E-mail: {satou.a-cg, shitomi.t-gy, takeuchi.t-de, okano.m-fk, tsuchida.k-fy}@nhk.or.jp

**あらまし** 地上放送の方式である ISDB-T の利点の一つに、同一周波数を用いたネットワーク (SFN : Single Frequency Network) を構築し周波数を有効に利用できる点が挙げられる。次世代地上放送の伝送方式では伝送容量を拡大するためにキャリア変調を高次化することが検討されている。その場合、SFN 環境における伝送特性の劣化が懸念されるため、筆者らは、SFN を構成する 2 つの放送所から送信する信号に対して時空間符号化を適用する符号化 SFN 技術を検討し、郊外において野外実験を実施して伝送特性を評価してきた。今回、現行の地上デジタル放送で SFN を構築している墨田、戸塚、平塚のエリア内において伝搬路応答を取得し、取得した伝搬路応答を用いた計算機シミュレーションで符号化 SFN の伝送特性を評価した。都市部の SFN 環境においても、符号化 SFN は従来の SFN と比較して伝送特性が改善することを確認したため、この結果を報告する。

**キーワード** 次世代地上放送, SFN, STC

## Transmission Performance Evaluation of SFN Technology with Space Time Coding

—Evaluation with Channel Response measured in actual SFN Environments—

Akihiko SATO Takuya SHITOMI Tomoaki TAKEUCHI Masahiro OKANO Kenichi TSUCHIDA

NHK Science & Technology Research Laboratories, 1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510 Japan

E-mail: {satou.a-cg, shitomi.t-gy, takeuchi.t-de, okano.m-fk, tsuchida.k-fy}@nhk.or.jp

**Abstract** ISDB-T, terrestrial broadcasting system in Japan, can construct Single Frequency Network(SFN) to improve frequency usage efficiency. Higher order modulation technology is being considered in next generation terrestrial broadcasting systems to improve transmission capacity, however, it might degrade transmission performance under the broadcasting area with SFN. We had reported that space time coding(STC) can improve the performance, by field test conducted in rural area. In this paper, we evaluated the transmission performance of SISO transmission system using STC by computer simulation with channel response measured in the actual SFN broadcasting area. This paper reports that SFN using STC have better performance than SFN without STC even in the multipath environment such as urban area.

**Keyword** Terrestrial Broadcasting, Single Frequency Network, Space Time Coding

### 1. まえがき

筆者らは、放送サービスの高品質化および高機能化に向けて、次世代地上放送の暫定仕様<sup>[1]</sup>を検討しており、日本の地上デジタル放送方式である ISDB-T<sup>[2]</sup>の長所を継承した仕様となるよう考えている。ISDB-T はマルチパス耐性をもつ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を採用しており、同一周波数によるネットワーク (以下、SFN) が構築できる。現行の地上放送は SFN を活用して全国のネットワークおよびエリアを構築しているため、次世代地上放送において現状と同じネットワークを構築した場合でも、既存の放送エリアを満足できるよう留意する必要がある。

一方、暫定仕様は、4K や 8K を伝送できるよう伝送容量の拡大を図っており、キャリア変調を 4096QAM

まで拡大することが可能である。誤り訂正符号に LDPC (Low Density Parity Check) 符号を適用することで伝送耐性の向上を図っているが、キャリア変調を高次にすることで、SFN を構築する複数の放送所同士の電波 (以下、SFN 波) を受信することによる伝送特性の劣化が大きくなることが懸念される。

これに対し、1 つの信号に対して時空間符号化 (STC : Space Time Code) 技術を適用し、異なる 2 つの信号とした後に放送所から送信することで、SFN 波による伝送特性の劣化を低減する方式が検討されている<sup>[3]</sup>。筆者らはこれまで、偏波 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 伝送に STC を適用した方式を検討し、野外実験によって伝送特性を評価してきた<sup>[4]</sup>。しかし、従来実施してきた野外実験は郊外地区であり、SFN 波を除き、マルチパスが少ない良好な伝搬環境であった。

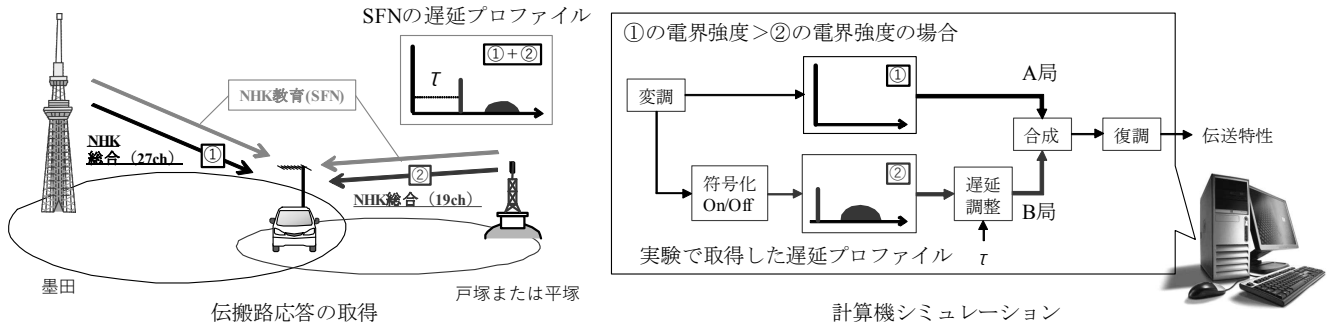


図1 伝送特性の評価手法

今回、関東地域で実際に SFN を構築している墨田デジタル放送所（東京スカイツリー，以下，墨田），戸塚デジタル中継放送所（以下，戸塚），平塚デジタル中継放送所（以下，平塚）の放送エリア内において地上デジタル放送波を受信し，都市部における伝搬路応答を取得した．さらに，取得した伝搬路特性を用いた計算機シミュレーションで，時空間符号化を適用した SISO（Single-Input Single-Output）伝送による SFN 方式（以下，符号化 SFN）の伝送特性を評価した．都市部のようにマルチパスの影響を受ける環境においても，時空間符号化を適用することで伝送特性が改善することを確認したため，この結果を報告する．

## 2. 伝送特性の評価手法

伝送特性の評価手法の概要を図1に示す．まず，SFNを構築する放送エリアで，実際の SFN 環境における伝搬路応答を取得した．更に，取得した伝搬路応答を用いた計算機シミュレーションで伝送特性を評価した．

### 2.1. 伝搬路応答の取得

図2に，墨田，戸塚，平塚のチャンネルと位置の関係を示す．これらの放送所は，NHK 教育で SFN を構築している一方，NHK 総合では，県毎に異なるチャンネルでネットワークを構築している．このため，NHK 教育のチャンネルで伝搬路応答を取得することで SFN

関係の遅延プロファイルが算出でき，2 局の到来時間差  $\tau$ （ $\mu$  秒）を解析することが出来る．一方，NHK 総合のチャンネルで送信される放送波を測定することで，同一の送信条件における各放送所からの個別の伝搬路応答と，2 局の電界強度比を取得することが出来る．

野外実験では，戸塚および平塚の放送エリア内において，“墨田と戸塚“または”墨田と平塚“の 2 局の SFN を想定し，合計 18 地点で地上デジタル放送の電波を測定した．各地点では，墨田と戸塚または平塚の 2 方向に，NHK 総合の電波の電界強度が最大となるよう受信アンテナを調整し，1 地点につき 2 サンプルの SFN 関係を取得した．そのうち，伝搬路応答を良好に観測できた 33 サンプルを用いて伝送特性を評価した．

### 2.2. 計算機シミュレーション系統

図3に計算機シミュレーションブロックを示す．ここでは，SFNを構成する2つの送信所をA局，B局と表記する．本報告では，野外実験で測定した2局のうち電界強度が高い送信所をA局として伝送特性を評価した．

変調部は，23 次 PN の系列で発生させたビット列に対して誤り訂正符号，キャリア変調，各種インターリーブを適用した後，A 局および B 局で送信する信号に対して STC を適用する．図4に，STC 処理を示す．STC には Alamouti 符号を用いる STBC（Space Time Block Code）を適用し，B 局の信号について，時間方向に連続した 2 つのキャリアシンボルを入れ替え，複素共役を求めた．また，受信側で 2 系統の伝搬路応答を個別に推定できるようにするため，2 直交型のパイロット信号を挿入した．

伝搬部では，野外実験で取得した 2 局の遅延時間差，電界強度差比，個別の伝搬路応答を用いて SFN 関係を再現する．時間領域の OFDM 信号に対して，A 局の遅延プロファイル  $h_A[n]$  および B 局の遅延プロファイル  $h_B[n]$  を畳込み演算することで伝搬路を付与した．また，伝搬路付与後の A 局の信号電力を  $C_A$ ，伝搬路付与後の B 局の信号電力を  $C_B$  として定義し，野外実験で測定した電界強度差および到来時間差を再現するため，B 局の信号に対して電力調整，遅延時間調整を行った



図2 墨田、戸塚、平塚のチャンネルと位置関係

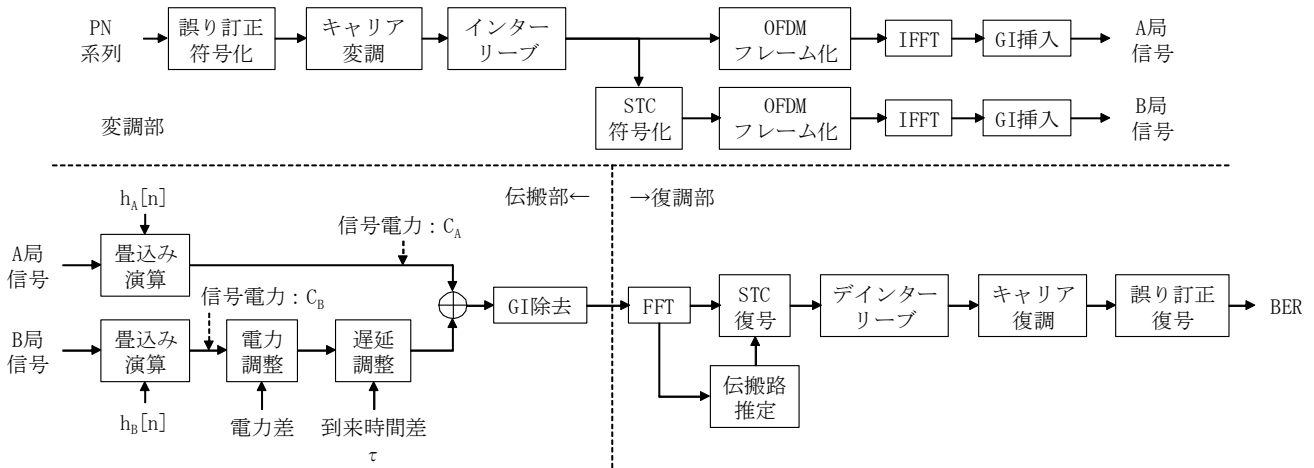


図3 計算機シミュレーションブロック

後に合成する。

復調部は、A局とB局の合成信号をOFDM復調し、パイロット信号を用いた伝搬路応答推定、推定した伝搬路応答を用いたSTC復号を行う。受信信号は以下の式で表される。

$$\begin{cases} Y(t,k) = S(t,k)H_A(t,k) - S(t+1,k)^* H_B(t,k) \\ Y(t+1,k) = S(t+1,k)H_A(t+1,k) + S(t,k)^* H_B(t+1,k) \\ \dots \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $Y(t,k)$ はシンボル番号  $t$ 、サブキャリア番号  $k$  の受信 OFDM キャリアシンボル、 $H_A(t,k)$ は同サブキャリア位置におけるA局の伝搬路応答の周波数特性推定値、 $H_B(t,k)$ は同サブキャリア位置におけるB局の伝搬路応答の周波数特性推定値である。以降、サブキャリア番号  $k$  は簡略のため省略する。また、固定受信環境を想定した場合、連続したシンボル間で伝搬路の時間変動は十分に小さく、 $H_A(t)=H_A(t+1)$ 、 $H_B(t)=H_B(t+1)$  であることから、伝搬路応答についてはシンボル番号  $t$  も省略する。STC復号の式を以下に示す。

$$\begin{cases} S'(t) = \frac{H_A^* Y(t) + H_B Y^*(t+1)}{|H_A|^2 + |H_B|^2} \\ S'(t+1) = \frac{H_B^* Y(t+1) - H_A Y^*(t)}{|H_A|^2 + |H_B|^2} \end{cases} \quad \dots (2)$$

ただし、 $S'(t)$ はSTC復号によって算出される送信信号  $S(t)$ の推定値、 $*$ は複素共役である。STC復号は、2つの受信キャリアシンボルを最大比合成し、送信したキャリアシンボルを復元する処理である。STC復号後の信号に対して各種デインターリーブ、キャリア復調、誤り訂正復号を行うことで、送信ビット列を復元し、ビット誤り率特性 (BER: Bit Error Rate) を算出した。

### 2.3. 計算機シミュレーション諸元

表1に、計算機シミュレーション諸元を示す。信号構造はISDB-Tに準拠し、FFTサイズを8,192本、キャ

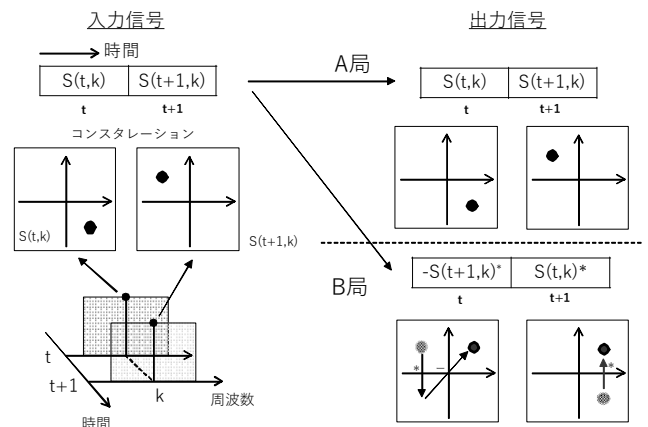


図4 STBC処理

表1 計算機シミュレーション諸元

帯域幅	5.57MHz
FFTサイズ	8,192本
キャリア総数	5,617本
GI比	1/8 (GI時間: 126μ秒)
パイロット比率	1/12
キャリア変調方式	256QAM
誤り訂正符号	LDPC符号 符号長: 44880 符号化率: 10/15
インターリーブ	時間、ビット、周波数
STC方式	Alamouti STBC
所要C/N	19.0dB (AWGN環境)

リア本数 5,617本、GIを126μ秒、SPを周波数方向に3サブキャリア、時間方向に4シンボル間隔に挿した。キャリア変調と誤り訂正符号には、所要C/Nが地上デジタル放送と同程度となる、256QAMとLDPC符号(符号長44800、符号化率10/15)を用いた。なお、256QAM(10/15)のAWGN環境における所要C/Nは19.0dBである。また、STCを適用せず、A局とB局から同一の信号を送信する従来型のSFN(従来SFN)についてもBERを算出し、符号化SFNとの比較を行った。

### 3. 従来 SFN と符号化 SFN の伝送特性

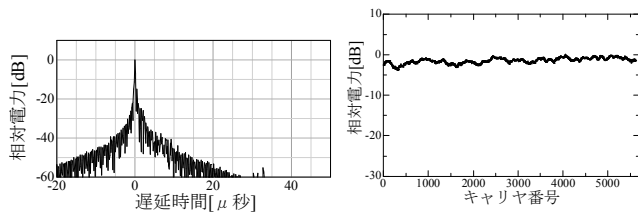
外符号として BCH 符号を想定し、BER が  $1.0 \times 10^{-7}$  を下回る最小の  $C_A/N$  を所要  $C_A/N$  と定義し、伝送特性の評価指標とする。

#### 3.1. 符号化で伝送特性が改善した伝搬路の一例

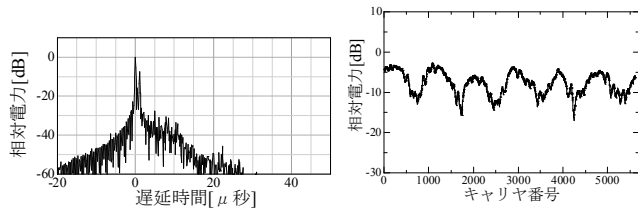
図 5 および図 6 に、従来 SFN と比較して符号化 SFN の伝送特性が良好となった地点の伝搬路応答、キャリア対変調誤差比 (MER : Modulation Error Ratio) と伝送特性の一例を示す。符号化 SFN のキャリア対 MER は、STC 復号後のデータキャリアの MER であり、 $(C_A+C_B)/N=30\text{dB}$  となる雑音を付加して算出した。

図 5 の地点は、A 局が墨田、B 局が戸塚であり、受信電力差  $C_A/C_B$  が 2.1dB、到来時間差が  $0.5 \mu\text{秒}$  であった。(a)に示す A 局の伝搬路応答の周波数特性に大きな歪みは無く、遅延プロファイルからもマルチパスの少

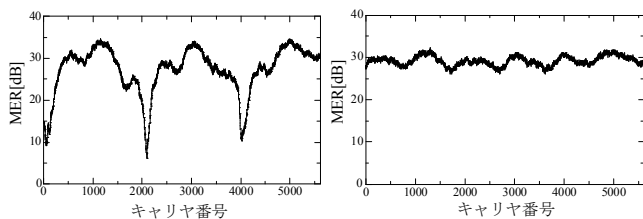
ない良好な伝搬環境であることがわかる。(c)に示す受信信号のキャリア毎の MER を見ると、A 局に対して B 局が合成されることで、従来 SFN ではキャリア毎の MER に大きな歪みが生じている。通常、遅れて到来する波 (遅延波) が合成されると、周波数特性には遅延時間差  $\tau$  の逆数 ( $1.0/\tau \text{ MHz}$ ) 間隔の周期でリップルが生じる。(c)に示した従来 SFN の MER 特性でも、B 局が遅延時間  $0.5 \mu\text{秒}$ 、電力比 2.1dB の遅延波として合成されることで生じる、約 2.0MHz (本信号構造では約 2000 サブキャリア) 間隔の大きい歪みに対応して MER が変動する様子が確認できる。一方、符号化 SFN では大きな歪みは生じていない。(d)に示す伝送特性では、A 局のみに対して従来 SFN では所要  $C_A/N$  が 1.0dB 劣化したが、符号化 SFN では 2.0dB 改善した。また、従来 SFN のみに対して符号化 SFN は 3.0dB 改善して



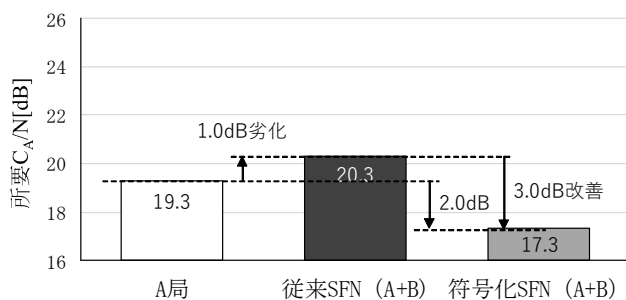
(a) A 局の遅延プロファイルと周波数特性



(b) B 局の遅延プロファイルと周波数特性

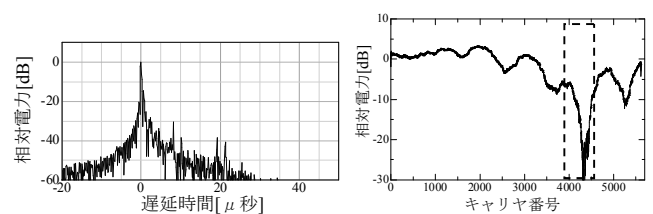


従来 SFN                      符号化 SFN  
(c) 受信信号のキャリア毎の MER 特性

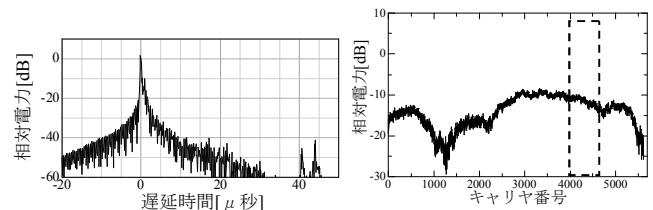


(d) 伝送特性の比較

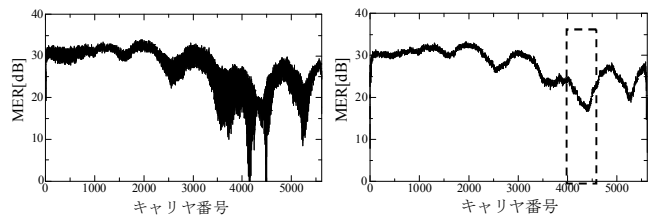
図 5 計算機シミュレーション結果の一例①



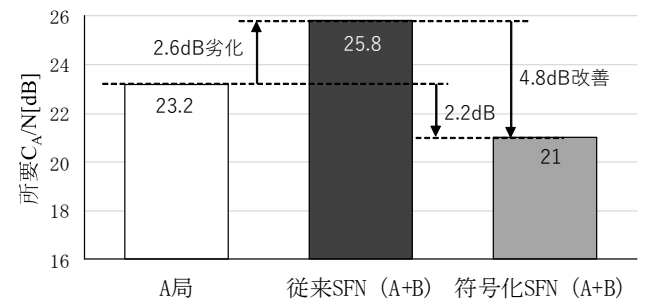
(a) A 局の遅延プロファイルと周波数特性



(b) B 局の遅延プロファイルと周波数特性



従来 SFN                      符号化 SFN  
(c) 受信信号のキャリア毎の MER 特性



(d) 伝送特性の比較

図 6 計算機シミュレーション結果の一例②

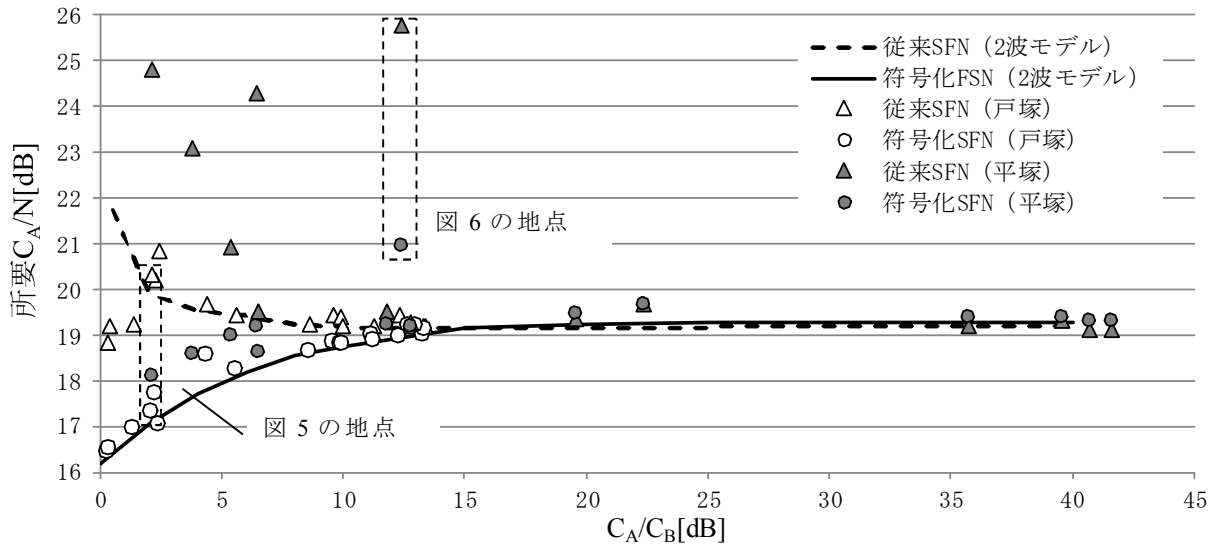


図7  $C_A/C_B$  に対する所要  $C_A/N$  の特性

いる。これは、図5の地点のようにA局の周波数特性が良好であり、B局との受信電力差が小さい場合には、B局を受信することでダイバーシティ利得を得られるためである。

図6の地点はA局が平塚、B局が墨田であり、受信電力差  $C_A/C_B$  が 12.4dB、到来時間差は 125.6  $\mu$  秒である。(a)に示すようにA局の周波数特性にはマルチパスによる 30dB 程度の大きなギャップが生じている。(c)に示すキャリア毎のMER特性において、従来SFNでは、B局が 125.6  $\mu$  秒の遅延波として合成されることで、A局の周波数特性に 1/125.6  $\approx$  0.008MHz 間隔の短周期の歪み加わる形でMERが変動しており、30dB程度のギャップは残留していることがわかる。一方、符号化SFNでは同様の歪みは生じておらず、30dB程度のギャップが生じていないことがわかる。(d)に示す伝送特性では、A局のみに対して従来SFNでは所要  $C_A/N$  が 2.6dB劣化したが、符号化SFNで 2.2dBの改善した。また、従来SFNに対して符号化SFNは 4.8dB改善している。この地点では、B局の電力がA局に対して 12.4dB低い場合、帯域全体でのダイバーシティ利得は期待できないが、図6(a)および(b)の周波数特性において破線で示すA局の周波数特性が 30dB落ち込むキャリア位置において、B局の周波数特性の相対電力は -10dB程度ある。このため、A局のみでは電力が落ち込むようなキャリアにおいて、電力の大きいB局のキャリアシンボルが最大比合成されることで、伝送特性が改善したと考えられる。

### 3.2. 全サンプルの結果

図7に、野外実験で取得した全33サンプルのSFN関係を用いた算出した  $C_A/C_B$  に対する所要  $C_A/N$  特性を示す。横軸に電力差  $C_A/C_B$ 、縦軸に所要  $C_A/N$  において全地点の結果をプロットしたグラフである。図中に

は、従来SFNでの所要  $C/N$  を  $\Delta$  で、符号化SFNでの所要  $C/N$  を  $\circ$  でプロットする。また、A局の直接波とB局の直接波のみを合成する単純なSFNのモデルにおける特性も、2波モデルと表記して併記する。

図7より、 $C_A/C_B$  が 15dB以下である領域において、符号化SFNの所要  $C_A/N$  が従来SFNと比較して改善することが確認できる。 $C_A/C_B$  が特に小さい環境では符号化SFNによる利得が大きく、今回のシミュレーションでは、電力差が 0.3dBの地点において、AWGN環境と比較して所要  $C_A/N$  が 2.5dB改善する結果が確認できた。また、2波モデルと実験で取得した伝搬路を用いた場合の所要  $C/N$  の差が大きい環境、すなわち、A局のみでもマルチパスによる伝送特性の劣化が大きい環境においては従来SFNと符号化SFNの差は大きく、符号化SFNの利得が大きく得られている。

### 4. あとがき

現行の地上デジタル放送で実際にSFNを構築している墨田、戸塚、平塚の放送エリア内で伝搬路応答を取得し、計算機シミュレーションによって時空間符号化を適用したSFN方式の伝送特性を評価した。

2局の電界強度比が小さい環境において、従来SFNではA局に対してB局が遅延波として加わることで伝送特性が劣化するが、符号化SFNを適用することで、B局が加わることによる伝送特性の劣化が生じないことが確認できた。2局の電界強度比が特に小さい環境では、B局が利得となり、所要  $C/N$  が最大で 2.5dB改善した。また、2局の電界強度比が 10dB程度となる環境においても、A局の周波数特性に大きな歪が生じる場合、B局の信号が合成されて周波数特性が補完されることで、伝送特性が大きく改善する現象もあった。

今後、伝搬路応答のサンプル数を増やして評価を行

うとともに、次世代地上伝送方式に対応した変復調装置の試作器を用いた室内実験により、実機による評価を行っていく。

### 文 献

- [1] 竹内 他：“次世代地上放送に向けた暫定仕様の検討”，映情学年次大，31A-1(Aug.2016)
- [2] (社)電波産業会 (ARIB)：“地上デジタルテレビジョン放送の伝送方式”，STD-B31
- [3] S.M.Alamouti：“A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications”，IEEE J.Select. Areas Commun, vol.16, No.8, pp.1451-1458( Oct.1998)
- [4] 齋藤 他：“熊本・人吉地区での次世代 SFN 実験”，映情学年次大，33D-2( Aug 2015)