

指向性制御による地上デジタル放送移動受信特性 の改善方法の検討

柴田伝幸[†] 三田勝史[†] 伊藤修朗[†] 藤元美俊[†] 今井純志[†] 伊藤健二[†]
Email: [†]shibata@mcl.tytlabs.co.jp

あらまし 2003年に実用化される地上デジタル放送を自動車などの移動体において受信する場合、低アンテナ高によるC/Nの低下、伝搬路特性の激しい変動などにより、家庭における固定受信と比較して受信特性が低下する。そこで、アンテナの指向性を常に最適な方向に制御することにより高速移動受信時の劣悪な電波環境下でも受信品質を確保する指向性制御方式を提案し、同方式を用いた指向性制御システムを開発した。フィールドでの実験結果から、アンテナ1素子で受信した場合と比べ、受信特性を大幅に改善できることを確認した。

A Study on Improvement of Terrestrial Digital Broadcasting Reception by Antenna Directional Pattern Control

Tsutayuki Shibata[†] Katsushi Sanda[†] Nobuo Itoh[†]
Mitoshi Fujimoto[†] Junji Imai[†] Kenji Ito[†]
Email: [†]shibata@mcl.tytlabs.co.jp

Abstract The Japanese terrestrial digital broadcasting service will be launched in 2003. The reception quality of the terrestrial digital broadcasting will be degraded by the heavy fluctuation of the electric field strength while mobile receiving. In this paper, a control method of antenna directional pattern for the terrestrial digital broadcasting reception is proposed to improve such degradation. We develop the control system that is applied to the method. As the field experimental result, it is confirmed that the reception quality is improved compared with the case when an omni-directional antenna.

1. はじめに

地上波を用いたデジタルテレビ放送は2003年にまず3大都市圏でサービスが開始され、2006年には全国で開始される予定である[1]。地上テレビ放送のデジタル化メリットの一つとして、列車や自動車等の移動体でもクリアな映像受信が可能になることが挙げられる。また、移動中の各種情報収集は、携帯電話のインターネット接続サービスやITS

(高度道路交通システム)の交通情報配信に見られるように、IT化にとって非常に重要になってきており、特に大容量伝送が可能な地上デジタル放送に期待が寄せられている。

わが国の地上デジタル放送では、マルチパス伝搬路における遅延分散に強い耐性を有するOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing:直交周波数多重)伝送方式が採用されているが、高速で移動する列車・自動車等の移動受信では、アンテナの設置高が低いことによるC/N(Carrier to Noise Ratio:搬送電力対雑音電力比)の劣化や伝搬路特性の激しい変動などが発生する。そのため、地

株式会社豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県長久手町
Toyota Central R & D Laboratories Inc.
Nagakute-cho, Aichi-pref. 480-1192 JAPAN

上高約 10m 程度に配置された指向性（八木）アンテナによる固定受信の場合と比較して受信環境は劣悪である。その結果、固定受信では、高精細テレビ放送用伝送が可能なビットレート 20Mbps（サブキャリア変調方式：64QAM，符号化率：7/8）が伝送可能であるのに対し、高速移動受信ではビットレート 4Mbps（サブキャリア変調方式：DQPSK，符号化率：1/2）の伝送止まることは、各地の地上デジタル放送実験協議会での移動受信実験結果として報告されている[2]。

そこで、移動受信のような劣悪な電波環境においても通信品質を確保するために、アンテナの指向性を常に最適な方向へ電子的に制御する方式について検討している。本報告では、まず地上デジタル放送の移動受信用指向性制御方式について述べ、次に同方式を採用した指向性制御システムの全体構成について述べる。さらに、フィールドにおいてデジタル放送試験電波を受信して同システムを評価した結果を示す。

2. 指向性制御の方法

2.1 指向性制御の原理

複数のアンテナ素子を用いて適応的に指向性を制御するシステムの一般的な構成（ K 素子システム）を図 1 に示す。図中の複素乗算器は、各アンテナ素子で受信された信号に対してそれぞれの振幅と位相を調整するためのものであり、ベースバンド信号処理では複素入力信号（I,Q 成分）に複素数の重み係数を乗算することにより実現される。

時刻 t に複数のアンテナ素子で受信された信号 $x_1(t)$, $x_2(t)$, \dots , $x_K(t)$ は、それぞれ重み係数 w_1 , w_2 , \dots , w_K が掛けられた後に合成され出力信号 $y(t)$ となる。ここで、入力信号および重み係数を、それぞれ次のようにベクトル表示すると、

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_K(t)]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_K]^T \quad (2)$$

システムの出力信号 $y(t)$ （以下、合成出力と

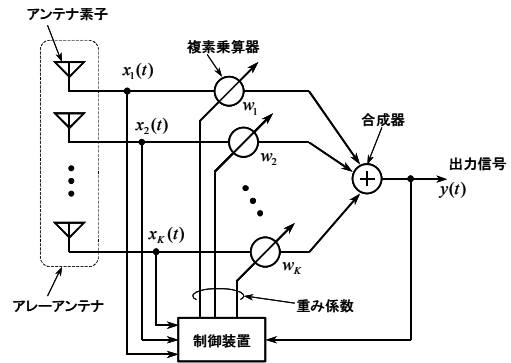


図1 指向性制御システムの一般的な構成

呼ぶ) は、

$$y(t) = \mathbf{X}^T(t) \mathbf{W}^* = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (3)$$

のように表わされ、出力電力 P_{out} は

$$P_{out} = \frac{1}{2} E[y(t)^* y(t)] = \frac{1}{2} \mathbf{W}^H R_{xx} \mathbf{W} \quad (4)$$

となる。ただし、添字*は複素共役を表し、 T および H は、それぞれ行列の転置および複素共役転置を表す。

次に、指向性制御の原理を簡単に説明するために、アンテナ素子の配置として直線状（リニアアレー）を考える。いま、到来波が θ 方向から到来するものとする。位相の基準点での受信信号を $E_0(t)$ とし、各アンテナ素子の受信特性が等しいとすると、 k 番目のアンテナ素子に誘起される信号は次式で表される。

$$E_k(t) = E_0(t - \tau_k) \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (5)$$

$$\tau_k = \frac{d_k \sin \theta}{c} \quad (6)$$

ただし、 c は伝搬速度、 d_k は基準点より測った k 番目の素子の位置である。さらに、受信信号がアレーの開口長 $|d_k - d_1|$ に対して十分狭帯域、すなわち、

$$2\pi \Delta f \cdot \frac{|d_k - d_1|}{c} \ll 1 \quad (7)$$

(Δf : 受信信号の帯域幅)

であれば、 f を搬送波周波数として、

$$E_0(t - \tau_k) \cong E_0(t) \cdot \exp(-j 2 \pi f \tau_k) \quad (8)$$

とおくことができる．このとき式(5)の第 k 素子の受信信号は，

$$\begin{aligned} E_k(t) &= E_0(t) \cdot \exp(-j 2 \pi f \tau_k) \\ &= E_0(t) \cdot \exp\left(-j 2 \pi f \frac{d_k}{c} \sin \theta\right) \\ &= E_0(t) \cdot \exp\left(-j \frac{2 \pi}{\lambda} d_k \sin \theta\right) \end{aligned} \quad (9)$$

と表される．ここに， $\lambda = c/f$ は搬送波の波長である．

各アンテナ素子で受信した信号に対して重み係数を掛けて合成すると，合成出力 $y(t)$ は

$$\begin{aligned} y(t) &= E_0(t) \sum_{k=1}^K A_k \cdot \exp\left(-j 2 \pi f \frac{d_k}{c} \sin \theta + j \delta_k\right) \\ &= E_0(t) \cdot D(\theta, f) \\ D(\theta, f) &\equiv \sum_{k=1}^K A_k \cdot \exp\left\{-j \left(2 \pi f \frac{d_k}{c} \sin \theta - \delta_k\right)\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

となる．ここに， A_k ， δ_k はそれぞれ k 番目の素子に掛けられる重み係数 w_k の振幅と位相である． $D(\theta, f)$ は，アレーアンテナの伝達関数を表す．すなわち，周波数 f を f_0 に固定し方向 θ を変化させたときの $D(\theta, f_0)$ が，周波数 f_0 におけるアレーアンテナの指向性を表す．また，方向 θ を θ_0 に固定し，周波数 f を変化させたときの $D(\theta_0, f)$ が θ_0 方向に対する利得の周波数特性を表す．従って，重み係数の振幅 A_k と位相 δ_k を制御することにより，アレーアンテナの指向性および周波数特性を変化させることができる．

2.2 地上デジタル放送受信用指向性制御

指向性を制御する方法としてはヌルステアリングとビームフォーミングの大きく 2 種類に分類される．前者はアンテナの指向性の低感度方向（ヌル）を不要波の方向に制御する方法，後者は所望波の方向に高感度ビームを形成する方法である．

地上デジタル放送の移動受信においては，低アンテナ高による C/N 劣化もマルチパス歪

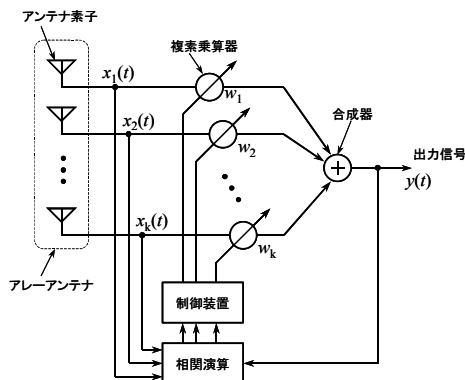


図2 地上デジタル放送受信用指向性制御方式

と並んで移動受信性能を劣化させる大きな要因であることから，今回は後者のアダプティブビームフォーミングの方式を基本とした方式を採用することとし，その一方式である最大比合成方式を応用する[3]．最大比合成では，合成後の SNR を最大とするため，各アンテナ素子で受信された受信信号に対して複素重み係数 \mathbf{W} によって同位相となるように重み付けを行い，その後合成する．あらかじめ参照信号として既知信号波形が与えられている場合には，個々の受信信号と参照信号との間の相互相関値を求め，これらを複素重み係数ベクトル \mathbf{W} として用いることにより最大比合成を実現する．すなわち，重み係数 \mathbf{W} は，

$$\mathbf{W} = r(t)^* \mathbf{X}(t) \quad (11)$$

で表される．明らかに重み係数ベクトル \mathbf{W} の各要素の絶対値は，対応する各入力信号の振幅に比例し， \mathbf{W} の位相成分は参照信号と各入力信号との位相差に対応することから，式(11)で最大比合成が実現される．

最大比合成は到来波方向に指向性を向けるビームステアリングであり，直接的に反射波を除去するわけではないが，SNR の改善による通信品質の向上が期待できる．地上デジタル放送のように，事前に既知である参照信号を利用することができない場合，特定のアンテナ素子で受信された信号と，それ以外のアンテナ素子で受信した信号との相関係数を該当素子の重み係数として使用する．つまり，第 1 素子 ($k=1$) を基準素子とすると，第 k 素子で受信された信号 x_k と第 1 素子で受信

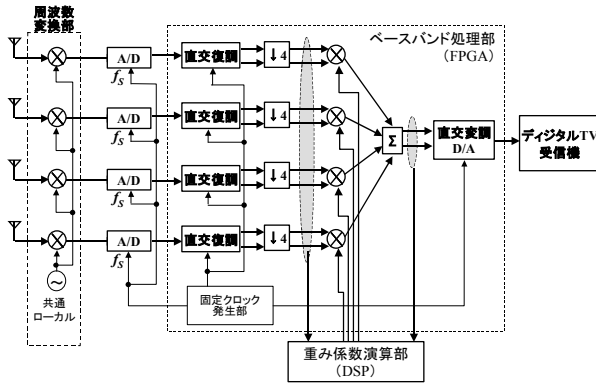


図3 地上デジタル放送受信用指向性制御システムの構成

された信号 x_l との相関係数を第 k 素子の重み係数とする。ここで、マルチパス波が到来し受信点によってアンテナ素子の受信レベルが大きく変動する場合には、1 つのアンテナ素子を基準信号とすると制御が不安定になってしまう。これを避けるために、相関係数を求めるための基準信号として合成後の信号を使用する方式を提案する。以下に、提案方式の構成および方法を説明する。

図 2 に地上デジタル放送の受信に適した最大比合成受信方式の構成を示す。第 k 素子で受信した信号に対する重み係数 w_k を決定するために、まず、アンテナでの受信信号 x_k と合成後の信号 y との相関係数 r_{ky} を求める。このとき、合成後の信号は所望波が支配的であるとすると、 r_{ky} の振幅は受信信号 x_k に含まれる所望波の成分との振幅差を表し、 r_{ky} の位相は合成後の信号に含まれる所望波の成分と受信信号 x_k に含まれる所望波の成分との位相差を表すことになる。従って、第 k 素子に対応する重み係数 w_k を、

$$w_k = r_k^* = E[x_k^* \cdot y] \quad (12)$$

とおくと、各素子で受信された信号 x_k に含まれる所望波の成分は全て同位相となる。 x_k には所望波および遅延波の成分が含まれるが、所望波の位相を揃えて合成すると、所望波の成分が強調される。このとき、 x_k に含まれる遅延波の位相はそれぞれランダムであるため、合成してもその振幅は確率的には変化しない。従って、結果的に到来してくる波の DUR (所

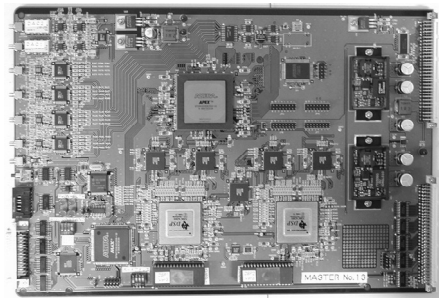


図4 指向性制御用信号処理ボード

望波と遅延波の電力比) よりも合成後の DUR が大きくなり、無指向性のアンテナ素子で受信する場合に比べ遅延波の影響が軽減される。

3. 指向性制御システムの構成

提案方式を採用した地上デジタル放送の移動受信用指向性制御システムを開発した。全体構成を図 3 に示す。4 本のアンテナ素子で受信された UHF 帯のデジタル放送電波を、それぞれチューナにて IF 信号に周波数変換する。周波数変換後の信号をそれぞれ A/D 変換した後、デジタル直交復調しベースバンド信号を出力する。得られた各ベースバンド信号に対して、重み付け合成部において複素係数を乗算して 1 本の信号に合成する。このとき乗算する複素係数は、4 系統のベースバンド信号と重み付け合成後のベースバンド信号との複素相関演算を行うことによって求められる位相差情報、及び振幅差情報に基づき決定する。合成後の信号は再び直交変調、D/A 変換され、IF 信号として出力される。

上記の処理のうち、4 本の IF 信号に対する A/D 変換から、直交復調、指向性制御演算、指向性制御のための重み付け合成、直交変調、D/A 変換出力までの処理部分は、図 4 に示す信号処理ボードで実現している。この信号処理ボードは 2 個の DSP と 1 個の FPGA 及び A/D、D/A から構成される。FPGA では、高速 (32MHz) の逐次動作が必須となる直交復調、帯域制限フィルタリング処理、および重み付け処理を行う。2 個の DSP で、合成後の信号と 4 本の受信信号との複素相関演算を行い、得られた複素相関演算結果を 1 個の DSP に

表 1 室内実験系の電波環境

ブランチ	所望波 到来方向	遅延波 到来方向
#1	0deg	45deg
#2	60deg	-135deg
#3	120deg	-30deg
#4	180deg	-150deg

DUR=6dB、遅延時間差=0.3μsec

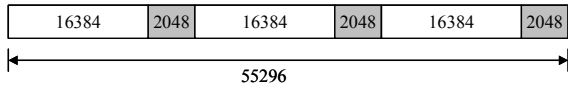
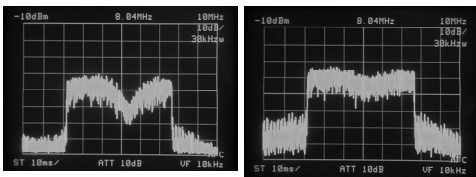


図5 信号フォーマット



(a) ブランチ#1 (b) 合成出力

図6 信号スペクトラム

集約して4個の重み付け用乗算器の複素係数を決定して、FPGAに設定している。

またこの信号処理ボードから出力されるIF信号は、地上デジタル放送用OFDM復調器およびMPEGデコーダによって復調・復号される。

4. 性能評価

4.1 室内実験による評価

提案方式を実装した指向性制御システムを簡単な室内実験において動作させて評価する。所望波と遅延波が到来する電波環境において、提案方式を用いることにより遅延波の影響を

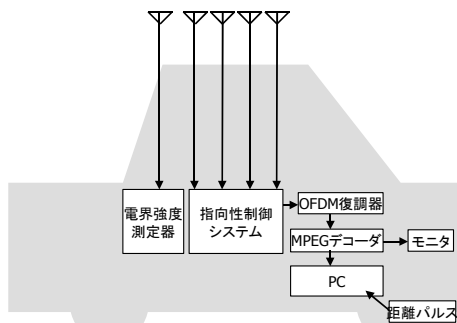


図7 実験車の構成

抑圧できることを確認する。所望波と1波の遅延波が表1のように到来していることを想定する。なお、室内実験の評価に使用するOFDM信号のフォーマットを図5に示す。

ブランチ#1で受信した信号のスペクトル(IF信号)を図6(a)に示す。所望波と1波の遅延波が同時に受信されるので、周波数選択性フェージングが発生しスペクトルが歪んでいる。なお、その他のブランチにおいてもスペクトルが歪んでいることを確認している。指向性制御システムを動作させて出力したIF信号のスペクトルを図6(b)に示す。提案方式により合成された信号のスペクトルはフラットとなって歪みが発生せず、遅延波が抑圧されていることがわかる。このことから指向性制御システムの基本動作を確認できる。

4.2 フィールド実験による評価

開発した指向性制御システムを実験車に搭載して走行し、地上デジタル放送の試験放送電波を用いて移動受信実験を行うことにより評価を行った。以下に、実験の条件、実験コースおよび実験結果を述べる。

フィールド実験では、東山送信所(名古屋市昭和区)から送信された地上デジタル放送実験電波(モード3, サブキャリア変調方式: 64QAM, 符号化率: 1/2, 周波数: UHF15ch, 送信出力: 1kW)を実験車(セダントype)で受信し、その受信特性を測定した。図7に実験車内の受信システムを示す。4本のアンテナ素子で受信した信号を指向性制御システムに入力して指向性を制御し、その

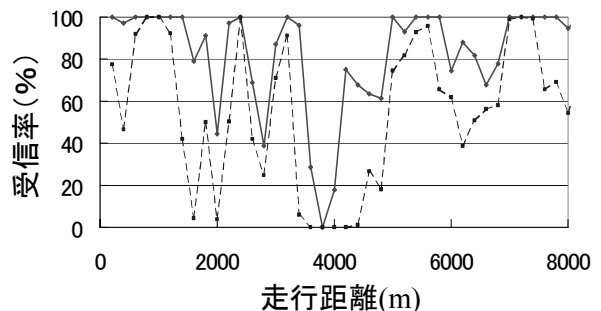


図8 受信率の測定例

(-----: 1素子受信, —: 指向性制御)

表 2 実験コースの平均受信率

指向性制御なし	指向性制御あり
48.5%	77.2%

出力信号を OFDM 復調器に入力して復調した。復調された信号 (MPEG2 の TS 信号) を MPEG デコーダに入力して復号し、映像および音声信号を得た。また同時に、別のアンテナ素子を用いてデジタル放送用電界強度測定器で受信電力を測定した。

受信率測定用のアンテナには市販の車載テレビ用ポールアンテナを利用し、実験車のルーフ (地上高約 1.5m) 後方の左右に設置した。受信電力測定用にはクロスダイポールアンテナを利用し、実験車のルーフ中央に設置した。

受信率は、走行時間中のデジタル放送が正常に受信されている時間的な割合を受信率として評価した。なお、受信率の測定に際しては、実験車の車軸から得られる距離パルス信号を用い、信号待ちなどにより実験車が停止している時間は取り除いた。

実験コースは、国道 153 号線の一部区間 (始点：東山送信所～終点：豊田市、距離約 17km) を選んだ。本コースは片側 2 車線の幹線国道であり、送信所から西南西へ直線的に離れるコースとなっている。コース始点付近は高層マンションが立ち並ぶ市街地であり、その後、見通しの良い開放地、低層の住宅が並ぶ郊外地などを通るので、様々な電波環境が存在すると考えられる。実験時の走行速度は平均時速 60km 前後であった。

図 8 に走行距離に対する受信率の測定結果の一例を示す。あわせて表 2 にコース全体の受信率を示す。これらから、指向性制御を行った方が受信率は高く、指向性制御が受信率の改善に大きく寄与していることがわかる。

5. まとめ

地上デジタル放送を自動車などで受信する場合、時々刻々変化する電波環境に対しても、アンテナの指向性が常に最適になるよう自動制御をする方式を採用し指向性制御システム

を開発した。そして、フィールド実験においてその有効性を確認した。

今後は、移動体への搭載性向上のために受信システム全体の簡略化に関する検討を進めていく予定である。

なお本研究は、通信・放送機構 (TAO) の「地上デジタルテレビ放送方式の高度化に関する研究開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/whatsnew/digital-broad/
- [2] 例えば、"東海地上デジタル放送研究開発支援センター利用報告書 第4回"東海地上デジタル放送実験協議会、(2001)。
- [3] 藤元他、"地上デジタル放送指向性制御受信に関する一検討"、2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-5-70、(2002)。