地上デジタルテレビジョン放送の等価 C/N 劣化量と搬送波 C/N に関する一検討

A Study on Equivalent C/N Degradation of Digital Terrestrial Television Broadcasting and C/N of Carrier

正会員 三木 信之[†], 大野 秀樹^{††}
Nobuyuki Miki[†] and Oono Hideki^{††}

あらまし 地上デジタルテレビジョン放送の各種特性劣化と伝送特性の関係については、まだ明確にされていないことが多い。今回、搬送波位相ノイズと搬送波 C/N および OFDM 変調波 C/N の関係を数式化し、伝送特性を定義する等価 C/N 劣化量との関係を明確にした。

キーワード：地上デジタルテレビジョン放送、等価 C/N 劣化量、OFDM、搬送波 C/N 、搬送波位相ノイズ

1. ま え が き

平成 11 年 5 月 24 日に第 117 回電気通信技術審議会が開催され、諮問第 74 号「デジタル放送方式に係る技術的条件」のうち「地上デジタルテレビジョン放送方式の技術的条件」と諮問第 98 号「デジタル放送導入のための地上放送の置局に関する技術的条件」のうち、「地上デジタルテレビジョン放送の置局に関する技術的条件」が承認された^{1)~4)}。

地上デジタルテレビジョン放送開始に向けて、伝送システム等の各種検討が進められているが、各種特性劣化と伝送特性の関係については、まだ明確にされていないことが多い。本報告では、搬送波位相ノイズと搬送波 C/N および OFDM 変調波 C/N の関係を明確にし、搬送波位相ノイズの一例により、搬送波 C/N と OFDM 変調波 C/N の差が僅かであることを示し、搬送波 C/N と伝送特性を定義する等価 C/N 劣化量との関係を明確にする。

2. 等価 C/N 劣化量と等価 C/N

ディジタル伝送システムの特性を劣化させる要因としては、搬送波位相ノイズ(搬送波 C/N)、混変調(IM 量)、マ

ルチパス等があるが、すべての特性は、等価 C/N 劣化量で定義することができる。特定の誤り率を与える理想 C/N を $C/N_{\text{理想}}$ 、伝送装置や伝送路の等価 C/N を等価 $C/N_{\text{伝送}}$ とすると、伝送装置や伝送路の等価 C/N 劣化量(dB)は次式で表される⁵⁾。

$$\text{等価 } C/N \text{ 劣化量} = -10 \log_{10} \left[1 - \frac{C/N_{\text{理想}}}{\text{等価 } C/N_{\text{伝送}}} \right] \text{ (dB)}$$

等価 C/N とは、ある等価 C/N 劣化量となる伝送装置や伝送路の各種特性劣化を、同じ等価 C/N 劣化量を与える(同じ誤り率を与える)ガウス雑音に置き換えた場合の C/N のことである。

地上デジタルテレビジョン放送の場合は、特定の誤り率(変調: 64 QAM, 符号化率 7/8, ビタビ復号出力の誤り率: 2×10^{-4})に注目し、この誤り率を与える理想 C/N を $C/N_{\text{理想 dB}} = 22 \text{ dB}$ ($C/N_{\text{理想}}$ の dB 表示を $C/N_{\text{理想 dB}}$ とする)、伝送装置や伝送路の C/N を等価 $C/N_{\text{伝送 dB}}$ (等価 $C/N_{\text{伝送}}$ の dB 表示を等価 $C/N_{\text{伝送 dB}}$ とする)とすると、伝送装置や伝送路の等価 C/N 劣化量(dB)は次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{等価 } C/N \text{ 劣化量} \\ = -10 \log_{10} \left[1 - 10^{\frac{22 - \text{等価 } C/N_{\text{伝送 dB}}}{10}} \right] \text{ (dB)} \end{aligned}$$

等価 $C/N_{\text{伝送 dB}}$ と等価 C/N 劣化量の関係を図 1 に示す。

すべての特性劣化をまとめて等価 C/N 劣化量で定義すれば、伝送装置や伝送路の特性を一義的に定義でき、図 2 に示す系統で測定することができる。図 2 の測定結果が図 3 となったとき、測定結果から、等価 C/N 劣化量は次式で求められる(ただし、等価 C/N_{MdB} : 等価 C/N_{M} の dB 表示, 等価 C/N_{RdB} : 等価 C/N_{R} の dB 表示とする)。

1999 年 10 月 19 日受付, 1999 年 11 月 22 日採録

[†] 株式会社東芝 小向工場 放送映像機器設計部
(〒210-8581 川崎市幸区小向東芝町 1, TEL 044-548-5119)

^{††} 株式会社東芝 小向工場 放送映像機器開発部
(〒210-8581 川崎市幸区小向東芝町 1, TEL 044-548-5286)

[†] Komukai Works, Toshiba Corporation
(1, Toshiba-chou, Komukai, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-8581, Japan)

^{††} Komukai Works, Toshiba Corporation
(1, Toshiba-chou, Komukai, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-8581, Japan)

図 1 等価 $C/N_{伝送}$ dB 対等価 C/N 劣化量
Equivalent $C/N_{伝送}$ dB vs. Equivalent C/N degradation.

図 2 等価 C/N 劣化量測定系統
Block diagram of Equivalent C/N degradation measurement.

図 3 等価 C/N 劣化量の説明
Explanation of equivalent C/N degradation.

等価 C/N 劣化量 = 等価 C/N_{MdB} - 等価 C/N_{RdB} (dB)

しかし、雑音電力の測定誤差を 0.1 dB 以下にすることが難しいために、要求される等価 C/N 劣化量が 0.1 dB 程度以下である場合には、この方法での精度良い測定は困難である。

厳しい性能が要求される場合には、個別の特性劣化ごとに等価 C/N 劣化量との関係を明確にし、直接その劣化を精度良く測定することが必要となる。

3. 搬送波位相ノイズと搬送波 C/N および OFDM 変調波 C/N

OFDM 変調波になった状態で、帯域内の位相ノイズを測定することができないため、OFDM 変調波 C/N (OFDM 変調波の帯域内キャリアの全電力を C , 帯域内の全雑音電力を N) を直接求めることはできない。

OFDM 変調器で OFDM 変調波の帯域内の全電力と等しい電力の搬送波を出力し、ある伝送装置または伝送路を通過した後の搬送波について、搬送波位相ノイズを測定し、搬送波 C/N (搬送波の実効電力を C , 帯域内の全雑音電力を N) を求めることは可能であり、搬送波位相ノイズと搬送波 C/N および OFDM 変調波 C/N の関係を明確にすることで、OFDM 変調波 C/N を求めることができる。

3.1 搬送波位相ノイズと搬送波 C/N

図 4 左側に、搬送波位相ノイズの一例を示している。一般に、水晶等の発振器の位相ノイズは、約 5 個の位相ノイズ区間で近似される。6 個の周波数 $f_1 \sim f_6$ (Hz) に対し、位相ノイズ $N_1 \sim N_6$ (dBc/Hz) が与えられ、各区間が周波数 (Hz) の常用対数に対して直線で近似されている場合、搬送波周波数から f (Hz) の位相ノイズ $N(f)$ (dBc/Hz) は、次式で表される。

$$N(f) = N_j - (N_j - N_{j+1}) * \frac{\log_{10}(f) - \log_{10}(f_j)}{\log_{10}(f_j) - \log_{10}(f_{j+1})}$$

$$f_j \leq f \leq f_{j+1} \text{ (ただし, } j \text{ は 1 から 5 の整数)}$$

搬送波 C/N (dB 表示) は、上式を搬送波の両側で積分することにより、次式で表される。

$$\text{搬送波 } C/N = -10 \log_{10} \left(2 \int_{N_1}^{N_6} 10^{N(f)/10} df \right) \text{ (dB)}$$

3.2 搬送波 C/N と OFDM 変調波 C/N

OFDM 変調波の中心周波数を f_c , キャリヤ間隔を Δf , キャリヤの総本数を $2K_c + 1$ とすると、日本の地上デジタルテレビジョン放送方式 (ISDB-T) は表 1 の関係になる¹⁾。

搬送波から OFDM 変調波を発生させる場合、図 4 右側のようにになる。搬送波の実効電力と OFDM 変調波の平均電力が等しい場合、搬送波と OFDM 変調波の各キャリアのレベル差は、 $10 \log_{10}(\text{キャリア本数})$ (dB) となる (すべてのキャリアレベルが等しいとしている)。ただし、各キャリアの位相ノイズの相対レベル (dBc/Hz) は、搬送波と同じである。

図 4 搬送波位相ノイズおよび OFDM 変調波の位相ノイズ
Phase noise of carrier and phase noise of OFDM.

OFDM 変調波各キャリアの位相ノイズは、自分自信のキャリアの位相ノイズのうち、帯域(キャリア周波数±キャリア間隔/2)内の位相のノイズ(CPE: Common Phase Error)と、その他のすべてのキャリアの位相ノイズのうち自分自信の帯域(キャリア周波数±キャリア間隔/2)に入る位相のノイズ(ICI: Inter Carrier Interference)の総和となる。つまり、OFDM 変調波のうち、中央のキャリアの帯域内の位相ノイズは、自分自信のキャリアの位相ノイズと同じ値になり、端のキャリアについては ICI 成分が半分になる。

搬送波 C/N と OFDM 変調波 C/N は次のようになる。

搬送波 $C/N(f_c \pm (K_c + 0.5)\Delta f)$ は次式で表される。(3.1より積分区間を変更している)。

$$\text{搬送波 } C/N = -10 \log_{10} \left(2 \int_0^{(K_c+0.5)\Delta f} 10^{N(f)/10} df \right) \text{ (dB)}$$

OFDM 変調波の任意のキャリア周波数を f_n とすると

$$f_n = f_c + n\Delta f \text{ (ただし } n \text{ は } -K_c \sim K_c \text{ の整数)}$$

となり、搬送波 $\pm(K_c + 0.5)\Delta f$ の外側のノイズを 0 とすると、任意の OFDM 変調波キャリア f_n の位相ノイズは次式で表される。

$$f_n \text{ 位相ノイズ} = 2 \int_0^{(K_c+0.5)\Delta f} 10^{N(f)/10} df / (2K_c + 1)$$

OFDM 変調波の位相ノイズ ($f_c \pm (K_c + 0.5)\Delta f$ の帯域内の位相ノイズ) は次式で表される。

OFDM 変調波

$$\begin{aligned} \text{位相ノイズ} &= (2K_c + 2) \int_0^{(K_c+0.5)\Delta f} 10^{N(f)/10} df / (2K_c + 1) \\ &+ \sum_{n=1}^{K_c} \left(2 \int_0^{(K_c-n+0.5)\Delta f} 10^{N(f)/10} df / (2K_c + 1) \right) \end{aligned}$$

上式の第 1 項は、中心のキャリアの両サイドの位相ノイズと残りのキャリア ($2K_c$ 本) の片側の位相ノイズを加算したものであり、第 2 項は、中心のキャリアを除く残りのキャリア ($2K_c$ 本) のもう片側で、帯域内のものを加算したものである。

よって、OFDM 変調波 C/N (dB 表示) は次式となる。

OFDM 変調波 C/N

$$= -10 \log_{10} (\text{OFDM 変調波位相ノイズ}) \text{ (dB)}$$

表 1 ISDB-T のパラメータ
Parameters of ISDB-T.

	$2K_c + 1$	K_c	Δf (kHz)
Mode 1	1405	702	250/63
Mode 2	2809	1404	125/63
Mode 3	5617	2808	125/126

搬送波位相ノイズと搬送波 C/N および OFDM 変調波 C/N の関係は以上になる。

搬送波位相ノイズを測定することにより、OFDM 変調波 C/N が求まり、OFDM 変調波 C/N = 等価 $C/N_{\text{伝送 dB}}$ として、図 1 から等価 C/N 劣化量が求まる。

4. 搬送波 C/N , OFDM 変調波 C/N , 等価 C/N 劣化量の一例

図 5 に DVB-T 地上デジタルテレビジョン放送用送信ローカルオシレータの位相ノイズのスペクトルマスク⁶⁾を示す。表 2 に、その搬送波 C/N と OFDM 変調波 C/N およびその差を示す。Mode 3 で差が最大となるが、その差は僅かであり、約 0.03 dB 未満である。

図 6 に示す系統での UHF, 7 GHz, 13 GHz の搬送波位相ノイズの一例を図 7 に示す。

表 3 に、図 7 の搬送波 C/N , OFDM 変調波 C/N (Mode 3 の計算値), 等価 C/N 劣化量 (計算値および実測値) を示す。

今回の搬送波位相ノイズの例では、搬送波 C/N と OFDM 変調波 C/N の差は、最大で約 0.16 dB 程度であったが、搬送波 C/N と OFDM 変調波 C/N の差は、搬送波の位相ノイズ特性に依存し、最悪の場合 (CPE が非常に大きく、ICI が非常に小さい場合) 差がなくなり、搬送波 C/N = OFDM 変調波 C/N となる。計算が複雑な OFDM 変調波 C/N を使わず、搬送波位相ノイズを測定し搬送波 C/N を求め、搬送波 C/N = 等価 $C/N_{\text{伝送 dB}}$ として、図 1 から等価 C/N 劣化量を求めても、差は僅かである。

図 5 DVB-T 送信機用ローカルオシレータスペクトルマスク
Spectrum mask of local oscillator for DVB-T transmitter.

表 2 DVB-T 送信機用ローカルオシレータの C/N
 C/N of local oscillator for DVB-T transmitter.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3
搬送波 C/N (dB)	41.44626	41.44626	41.44626
OFDM 変調波 C/N (dB)	41.45173	41.45879	41.47498
搬送波 C/N と OFDM 波 C/N の誤差	-0.00547	-0.01253	-0.02872

図 7 搬送波位相ノイズの例
Examples of carrier phase noise.

表 3 搬送波 C/N と等価 C/N 劣化量の例
Examples of carrier phase noise and equivalent C/N degradation.

	DVB-T	UHF	7 GHz	13 GHz
搬送波 C/N (dB)	41.45	51.33	40.36	29.88
OFDM 変調波 C/N (dB)	41.48	51.49	40.38	29.91
等価 C/N 劣化量(計算) (dB)	0.05	0.005	0.06	0.77
等価 C/N 劣化量(実測) (dB)	—	0.0	0.1	0.8

図 6 搬送波位相ノイズ測定系統
Block diagram of carrier phase noise measurement.

7. む す び

本報告では、搬送波位相ノイズと搬送波 C/N および OFDM 変調波 C/N の関係を明確にし、UHF, 7 GHz, 13 GHz の搬送波位相ノイズの一例により、搬送波 C/N と OFDM 変調波 C/N の差が僅かであることを示し、搬送波位相ノイズを測定し、搬送波 C/N を求め、搬送波 C/N の dB 表示=等価 $C/N_{伝送}$ dB として図 1 により等価 C/N 劣化量を求めることができることを示した。

地上デジタルテレビジョン放送の実現に向け、全国で各種実験や研究が行われている。地上デジタルテレビジョン放送用伝送装置として持つべき特性については、今後明らかになってくるが、すでに等価 C/N 劣化量として 0.1 dB 以下の精度の測定が必要となってきた。本報告が僅かでも地上デジタルテレビジョン放送の実現に貢献できれば幸いである。

〔文 献〕

- 1) 第 117 回電気通信技術審議会資料 117-3, デジタル放送システム委員会報告
- 2) 第 117 回電気通信技術審議会資料 117-4, デジタル放送システム委員会報告参考資料
- 3) 第 117 回電気通信技術審議会資料 117-6, 地上テレビジョン放送等置局技術委員会報告
- 4) 第 117 回電気通信技術審議会資料 117-7, 答申(案)(諮問第 98 号関係)
- 5) 室谷正芳, 山本平一: “デジタル無線通信”, 産業図書
- 6) AC 106 Validate Deliverable 14, “Digital TV Transmitter Performance Specification” (Mar. 1998) (Rev 8)

みきのぶき
三木 信之 1975 年, 京都大学工学部電子工学科卒業。同年, (株)東芝入社。以来, 地上テレビジョン放送用送信装置の開発に従事。1997 年, (社)電波産業会に出向, 地上デジタルテレビジョン放送の実証実験に従事。1999 年, (株)東芝に復職。現在, 地上デジタルテレビジョン放送用送信装置開発に従事。正会員。

おおのひでき
大野 秀樹 1988 年, 明治大学工学部電気工学科卒業。同年, (株)東芝入社。以来, SNG 伝送装置の開発に従事。1997 年より, 地上デジタルテレビジョン放送用伝送路符号化装置の開発に従事。