マルチウェイ・スピーカのドップラ歪補償

Doppler Distortion Compensation for Multi-way Speakers

○米谷 昭彦 (名工大)

Akihiko Yoneya, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya

Key Words : Doppler Distortion, System Inversion, Multi-way Speaker

1. はじめに

オーディオシステムにおいてスピーカは電気信号を音圧に変換する重要な役割を担っているが、その動作原理からドップラ効果により相互変調歪 (以下、ドップラ歪と記す) が発生してしまう[1]。このドップラ歪が音質に与える影響については報告がないが、本報告ではドップラ歪を補償する方法について提案する。ドップラ歪は時間遅れの時間変化として現れるタイプの非線形歪であり、多ウェイスピーカを単一アンプにより駆動する場合には、複数の時変時間遅れを含む非線形性を補償する必要がある。そこで、system inversion [2]の考え方をを用いてこの多ウェイスピーカに対するドップラ歪を補償するアプローチを用いた。

2. 多ウェイスピーカのドップラ歪

ここでは2ウェイスピーカを例にとり、そのドップラ歪について説明する。対象とするスピーカシステムの概略をFig. 1に示す。

いま、ウーハーおよびツイータの変位を $p_w(t)$ および $p_t(t)$ 、微小信号における観測者までの音圧特性を

$$S_w(s) = G_w(s)U(s) \quad (1a)$$

および

$$S_t(s) = G_t(s)U(s) \quad (1b)$$

とする。ただし、 $U(s)$ はアンプの出力電圧 $u(t)$ のラプラス変換であり、 $S_w(s)$ および $S_t(s)$ はそれぞれウーハーおよびツイータによりもたらされる音圧である。このとき、微小ではない信号に対する観測者が観測する音圧は

$$s_o(t) = s_w(t - \frac{p_w(t)}{c}) + s_t(t - \frac{p_t(t)}{c}) \quad (2)$$

となる。ただし c は音速である。また $G_w(s)$ および $G_t(s)$ にも固定時間の無駄時間要素を含んでいる。

ここで問題となるのが、スピーカの変位によって変化する無駄時間の影響であり、本稿ではこの入力信号によって変動する無駄時間の影響を補償する手法を提案する。

3. System inversion による補償

System inversion はシステムの非干渉化器や非線形補償器の設計などに用いられる手法であり、本稿では離散時間システムに対して system inversion を適用することにより、複数の変動無駄時間となって現れる多ウェイスピーカにおけるドップラ歪補償を行う。本節では本報告で用いる離散時間系における system inversion の概略について説明する。

いま、一入出力の補償の対象が

$$\begin{aligned} x[k+1] &= A[k]x[k] + b[k]u[k] \\ y[k] &= c[k]x[k] \end{aligned} \quad (3)$$

と表されており、

$$c[k+1]b[k] > 0 \quad (4)$$

が常に成り立つものとする。ただし、 $A[k]$ 、 $b[k]$ 、 $c[k]$ は $x[k]$ および $u[k]$ に依存する場合もある。このとき、

$$x[k+1] = A[k]x[k] + b[k]v[k] \quad (5)$$

$$y[k] = c[k]x[k]$$

$$v[k] = u[k-1] \quad (6)$$

となるような $v[k]$ を生成する問題を考える。

この問題に対しては、

$$v[k] = (c[k]b[k-1])^{-1}(u[k] - c[k]A[k-1]x[k-1]) \quad (7)$$

とすることで解が得られることは簡単な計算で得られる。ただし、この補償器を含んだシステムが安定である必要がある。線形時不変系の場合は、補償の対象が不安定零点を持っていなければ安定となることは知られているが、非線形系や時変系の場合には注意が必要となる。

4. ドップラ歪補償への適用

本節では、前節で述べた補償手法をドップラ歪補償に適用する方法について考える。ここで、音源信号 $u[k]$ は PCM 信号で与えられ、補償器出力信号 $v[k]$ も PCM 信号であるとする。

まず、ウーハーおよびツイータの変位特性 $H_w[z]$ および $H_t[z]$ を予め測定しておく。すなわち、

$$P_w[z] = H_w[z]V[z] \quad (8a)$$

$$P_t[z] = H_t[z]V[z] \quad (8b)$$

により、ウーハーおよびツイータのコーンの変位の離散時間信号である $p_w[k]$ および $p_t[k]$ が推定できるようにしておく。

次に、ウーハーおよびツイータの音圧特性 $G_w(s)$ および $G_t(s)$ に対して、その振幅特性を表現する最小位相特性を持つ厳密にプロパーな伝達関数 $G_w^m(s)$ および $G_t^m(s)$ を測定し、実現しておく。

$$G_w^m(s) = c_w^c(sI - A_w^c)^{-1} b_w^c \quad (9a)$$

$$|G_w^m(j\omega)| = |G_w(j\omega)|, \forall \omega \quad (9b)$$

$$G_t^m(s) = c_t^c(sI - A_t^c)^{-1} b_t^c \quad (10a)$$

$$|G_t^m(j\omega)| = |G_t(j\omega)|, \forall \omega \quad (10b)$$

ドップラ歪補償を行う際、無駄時間補償をすることになるが、正の無駄時間を補償することはできないので、音圧特性 $G_w(s)$ および $G_t(s)$ に対して予め時間 $\tau - \frac{p_w(t)}{c}$ およ

び $\tau - \frac{p_t(t)}{c}$ だけ無駄時間を持たせたシステムを考える。すなわち、

$$\dot{x}_w(t) = A_w^c x_w(t) + b_w^c v(t) \quad (11a)$$

$$y_w(t) = c_w^c x_w(t - \tau + \frac{p_w(t)}{c})$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_t(t) &= A_t^c x_t(t) + b_t^c v(t) \\ y_t(t) &= c_t^c x_t(t - \tau + \frac{p_t(t)}{c})\end{aligned}\quad (11b)$$

とする。ただし、信号 $v[k]$ のサンプリング周期 T に対して $0 < \tau - \frac{p_w(t)}{c} < T$, $0 < \tau - \frac{p_t(t)}{c} < T$ が成り立つように τ の値を設定する。そして、上記のシステムを零次ホールドを用いて離散時間化する。ウーハーについては

$$x_w[k+1] = A_w x_w[k] + b_w v[k] \quad (12)$$

$$y_w[k] = c_w(p_w[k])x_w[k] + d_w(p_w[k])v[k-1]$$

$$A_w = \exp\{A_w^c T\}, b_w = \int_0^T \exp\{A_w^c t\} dt b_w^c,$$

$$c_w(p_w[k]) = c_w^c \exp\{A_w^c(\tau - p_w[k])\}$$

$$d_w(p_w[k]) = c_w^c \int_0^{\tau - p_w[k]} \exp\{A_w^c t\} dt b_w^c$$

ツイータについても同様に

$$x_t[k+1] = A_t x_t[k] + b_t v[k] \quad (13)$$

$$y_t[k] = c_t(p_t[k])x_t[k] + d_t(p_t[k])v[k-1]$$

$$A_t = \exp\{A_t^c T\}, b_t = \int_0^T \exp\{A_t^c t\} dt b_t^c,$$

$$c_t(p_t[k]) = c_t^c \exp\{A_t^c(\tau - p_t[k])\}$$

$$d_t(p_t[k]) = c_t^c \int_0^{\tau - p_t[k]} \exp\{A_t^c t\} dt b_t^c$$

となる。したがって、観測者が観測する音圧は

$$\begin{aligned}y[k] &= y_w[k] + y_t[k] \\ &= c_w(p_w[k])x_w[k] + c_t(p_t[k])x_t[k] \\ &\quad + \{d_w(p_w[k]) + d_t(p_t[k])\}v[k-1]\end{aligned}\quad (14)$$

に対して一定の無駄時間が掛かったものとなる。ここで、ドップラ歪を補償するためには、 $y[k] = u[k-1]$ とすればよいので、これを実現するためには

$$\begin{aligned}v[k] &= \{d_w(p_w[k]) + d_t(p_t[k])\}^{-1} \\ &\quad \{u[k] - c_w(p_w[k])x_w[k] - c_t(p_t[k])x_t[k]\}\end{aligned}\quad (15)$$

とすればよいことがわかる。ただし、補償器を含んだシステムの安定性には留意する必要がある。

5. 適用例

提案するドップラ歪補償をクリプトン社の2ウェイスピーカ KX-3P に対して適用してみた。スピーカの変位特性をモデル化したものを Fig. 2 に示す。ウーハーに関しては3次でモデル化し、ツイータについては4次でモデル化した。これらのモデルにはネットワークの特性も含んでいる。

また、このスピーカに対して音圧特性を測定し、それをモデル化したものを Fig. 3 に示す。この特性をもとに $G_w^m(s)$ および $G_t^m(s)$ を決めた。サンプリング周期は $T = 1/44100$ [s] とし、 $\tau = 0.8T$ とした。 $c_w(p_w[k])$, $d_w(p_w[k])$, $c_t(p_t[k])$ および $d_t(p_t[k])$ を逐次厳密に計算することは効率的ではないので、 $p_w[k]$ および $p_t[k]$ に対して $[0.7T, 0.9T]$ の範囲で3次の多項式近似を行い評価した。ドップラ歪のみの検出は困難であったが、試聴により

その効果を確認することができた。

Fig. 1: Structure of speaker system.

Fig. 2: Modeled cone deviation amplitude characteristics of the speakers at a driving voltage of 4 V_{amp}.

Fig. 3: Modeled frequency characteristics of the speakers.

Table 1: Specifications of the speaker (KX-3P).

type	two-way
rating input power	50 [W]
cross-over frequency	2500 [Hz]
dimension	350 x 219 x 290 [mm]

参考文献

- [1] Butterweck, H.J., "About Doppler nonlinearities in loudspeakers," 1989 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.3, pp. 2061 - 2063, 1989
- [2] Freund, E., "The structure of decoupled nonlinear systems," Int. J. Contr., 21, 3, pp. 443-450 (1975)