高速 1bit 直接量子化を用いた音響信号処理*

☆石原寧人，金本貴徳，八十島乙暢，及川靖広，山﨑芳男 (早大理工)

1　まえがき

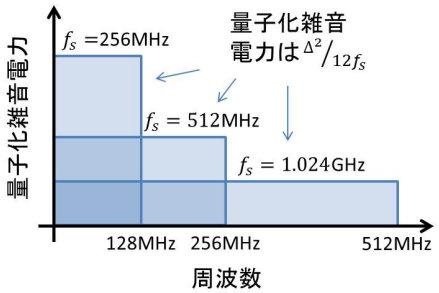
これまで我々は，ΔΣ変調を用いた高速 1bit 信号処理に関する研究を進めてきた．ΔΣ変調は安田により提案され [1]，現在幅広く利用されている．これは量子化雑音を制御して使用帯域外に集中させる手法であり，量子化ビットが数 1 の場合でも良好な SNR を得ることができる．

一方，PCM は通常マルチビットで使用されるが，適切なディザを用いて量子化雑音を均一に分布させ，標本化周波数を高くし量子化雑音を低くすれば，1bit でも十分なダイナミック・レンジを得ることができる．さらに，1bit PCM ADC はフィードバック機構を使用せず，デジタル IC のみで構成することが可能である．そのため，AD の高速化，広帯域化を図るとともに SNR を改善できると考えられ，様々な応用が期待される．

本報告では，量子化ビット数 1，標本化周波数 1.024GHz の ADC を試作し，LIDAR(LIght Detection And Ranging) を用いた音場の記録，パラメトリック・スピーカや無線等への応用について検討した．

2　ディザ

PCM 方式では，適切なディザを加えることにより，量子化雑音が全帯域に一様に分布し，標本化周波数を高くすれば図—1 のように量子化雑音電力密度を低くできる．また，量子化雑音電力密度は, 量子化ビット数が十分多い場合は, 量子化ステップ Δ と標本化周波数 f_s を用いて $\frac{\Delta^2}{12f_s}$ と表される．

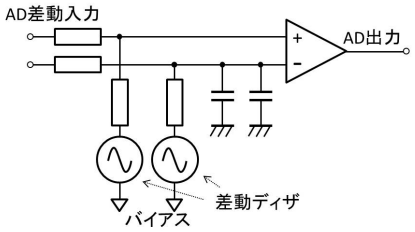


図— 1　ディザを加えた PCM における標本化周波数と量子化雑音の関係

量子化ビット数が 1 の場合も，標本化周波数を高くすることで量子化雑音密度を低くすることができ，さらに 1bbit 信号は, 使用帯域をフィルタで取り出すのみで復調が可能で DA を簡素にできる．また一般に，全体域に加えたディザを量子化後に減算することには困難が伴う．しかし，高域に集中したディザ [2] を加えれば，ディザを減算した場合と同じ量子化雑音密度が得られ，かつ，ディザが加わった帯域も復調時のフィルタリングで取り除くことが可能である．

3　1bit PCM ADC 回路

図—2 に作成した ADC 回路を示す．量子化器として，FPGA のデジタル差動入力を用いた．また，ディザとしては，FPGA のスペクトル拡散機能を用いて発生させた，周波数変動を有する矩形波を，LPF に通して三角波にしたものを用いた．表—1 に ADC 回路の諸設定を示す．



図— 2　ADC 等価回路

表— 1　ADC 回路の仕様

量子化ビット数	1
標本化周波数	1.024GHz
FPGA	Xilinx 社，XC6SLX9 C2
入出力	LVDS，ISERDES，OSERDES[5]

4　応用

4.1　1bit 演算

高速な 1bit 直接演算を試み，シミュレーションを行った．各演算において，入力 1bit 信号を x，y，出力 1bit 信号を z とする．また，それぞれの信号成分を s_x，s_y，s_z，雑音成分を n_x，n_y，n_z とすると，$x = s_x + n_x$ のようになる．

4.1.1　加算平均

表—2 のように演算すると，$s_z = \frac{1}{2}(s_x + s_y)$ なる結果が得られる．1 と 0，0 と 1 が入力された場合は，前回この入力パターンにおいて 0 を出力した場合は 1 を，1 を出力した場合は 0 を出力する．この演算の様子を図—3 に示す．

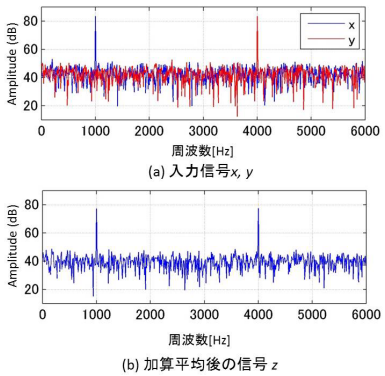
4.1.2　AM 変調

x を可聴域の信号, y をキャリアの信号とし, $z = x \cdot y$ のように論理積を取ると，キャリアを可聴域の信号で

*Acoustic signal processing using high speed 1bit direct quantization. Yasuhito ISHIHARA, Takanori KANEMOTO, Otonobu YASOJIMA, Yasuhiro OIKAWA and Yoshio YAMASAKI (Waseda University).

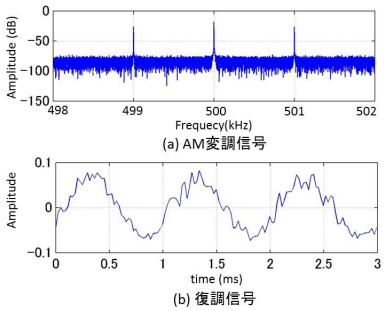
表— 2　1bit 加算平均演算の真理値表

x	y	z
1	1	1
1	0	1 と 0 を交互に出力
0	1	
0	0	0



図— 3　加算平均演算

AM 変調をした成分を得ることができる．図—4 に変調信号と復調信号を示す．



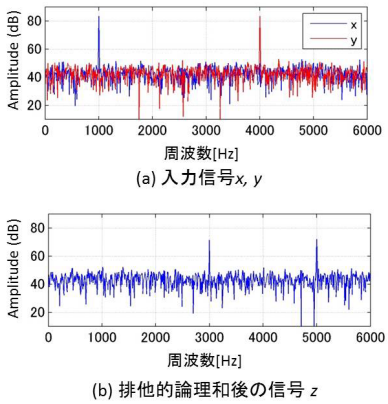
図— 4　1bit 直接 AM 変調

4.1.3　和と差の周波数への変換

x, y をそれぞれ正弦波の 1bit 信号とし，$z = x \bigoplus y$ のように排他的論理和を取ると，z は x，y の差と和の周波数，2 つの正弦波の成分を持つ信号となる．この様子を図—5 に示す．

4.2　LIDAR の原理を用いた音場の計測への応用

LIDAR を音場の計測への応用することを試みている．この手法は，レーザのパルスを射出し，空気の密度に比例した後方散乱光を観測することで音圧を得ること，または，後方散乱光のドップラ効果によって粒子速度を計測することを原理としている．後方散乱光がレーザ射出位置に帰ってくる時刻が，測定する空間座標に対応している．すなわち，レーザ・パルスの射出間隔が時間分解能を，後方散乱光を標本化する周波数が空間分解能を決めることになる．また，空間の標本化定理と光の速度を考えると，20kHz までの信号を観測するにはおよそ 35GHz の標本化周波数が必要となる．



図— 5　排他的論理和による和と差の周波数への変換

4.3　パラメトリック・スピーカ，無線等での多チャンネル出力

1bit ΔΣ変調は，パラメトリック・スピーカや，無線に応用されている [3][4]．ΔΣ変調においては，量子化雑音を使用帯域外に集中させることで良好な SNR を得ている．一方，ディザを用いた 1bit PCM では，標本化周波数を高くすれば，量子化雑音は一様に高い SNR を得ることができる．また，発振等の心配がない．このことから，多チャンネル化が容易に行える．

5　むすび

量子化ビット数 1，標本化周波数 1.024GHz の ADC を試作し応用例について検討した．特に，様々な 1bit 演算実現の可能性を示した．今後，ディザ生成回路の改善等を行う．

参考文献

[1] Hiroshi INOSE，Yasuhiko YASUDA，“A Unity Bit Codeing Method by Negative Feedback,” Proceedings of the IEEE，Vol.51，No.11，pp.1524-1535，1963.

[2] 山崎芳男，“広帯域音響信号の量子化への大振幅ディザの適用”，日本音響学会誌，Vol.39，No.7 号，pp.452-462，1983.

[3] 石井紀義，武岡成人，及川靖広，山崎芳男，“高速 1bit 信号によるパラメトリックスピーカの直接駆動”，音講論集，pp.631-632，2009，9.

[4] 前畑貴，戸谷一幸，朝夷奈巧，立花宏之，“1 ビットデジタル RF 無線装置の開発”, SEI テクニカルレビュー，No.182，pp.90-94，2013.

[5] Xilinx，ソース同期のシリアライズおよびデシリアライズ (最大 1050Mb/s)，XAPP1064(v1.1)，2010.