

Blu-ray ディスクフォーマットにおける リミットイコライザの効果

Effects of Limit Equalizer in Blu-ray Disc Format

小林 秀樹

Hideki Kobayashi

要 旨 我々が開発したリミットイコライザはBlu-ray ディスク規格に採用された。このリミットイコライザは符号間干渉を増加させることなく、Signal-to-noise ratio(SNR)を改善し、再生ジッターとエラーレートを改善する。リミットイコライザは非線形イコライザのため、変調データの全ての組み合わせにおいてリミットイコライザ使用時のジッターとエラーレートの改善度合いを2種類のシミュレーションにより検証した。その結果、リミットイコライザの使用により変調データの全組み合わせにおいてジッターとエラーレートが改善することを確認した。

Summary In 2002, the "limit equalizer" which we developed was utilized in the Blu-ray disc format. The limit equalizer improves signal-to-noise ratio without increasing inter-symbol interference and improves jitter and error rates during operation. The limit equalizer is a nonlinear equalizer and deterioration of individual data patterns had to be verified. We used two methods of computer simulation to study behavior of all data patterns of modulation code. We calculated jitter and error rates on individual data patterns in the case of adding low frequency noise as a degradation factor, and in the case of adding random noise or defocus as degradation factors. We derived characteristics of both jitter and error rates on combinations of neighboring run-lengths (preceding and succeeding run-lengths). The results confirmed that both jitter and error rates were improved by the use of a limit equalizer throughout the series of data pattern combinations.

キーワード : 高域強調, リミットイコライザ, SNR, シミュレーション, Blu-ray

1. 背景

書き換え型のBlu-ray ディスクフォーマットは、青紫レーザーダイオードと高NA対物レンズを使用し、(1,7)RLL符号で変調された23.3GB, 25GB, 27GBの3種類の容量を有し、2002年に規格化された。(1,7)RLL符号の最短反転間

隔(T_{min})は $2T$ である。ここで、 T は再生信号のチャネルビット長を示している。容量が25GBの場合、記録線密度は $0.112 \mu\text{m}/\text{bit}$ と高密度であり、このようにビットサイズが小さくなればなるほど、ディスクノイズは増加しSNRは減少する。我々は、ディスクノイズを減少させ、SNR

を改善するためにリミットイコライザを開発した。リミットイコライザはジッターとエラーレートに相関があることを以前検証した⁽¹⁾。それゆえ、リミットイコライザはBlu-rayディスクフォーマットに採用された。

図1に(1,7)RLL符号におけるリミットイコライザの構成を示す。まず、通常の線形イコライザはディスクからの再生信号を符号間干渉が最小となるように働き、リミットイコライザは線形イコライザの後段に位置する。リミットイコライザは、補間ブロック、リミッターブロック、FIRフィルタブロックの3つのブロックで構成されている。補間ブロックは、FIRフィルタブロックのタップを4タップにするため、0.5Tシフトしたデータを生成する。4タップにする理由については後述する。リミッターブロックは、2T信号振幅より少し大きいレベルで振幅制限する。そのため、2T信号はそのまま出力され、3T以上の信号は固定値のリミッター値が出力される。FIRフィルタブロックはタップ係数(-k, k, k, -k)の高域強調フィルタであり、リミットイコライザとしてはリミッターブロック後に位置するため2T信号だけを強調する回路となる。位相調整されたセンタータップ信号とFIRフィルタブロック出力の和がリミットイコライザの出力信号となる。振幅制限されていないセンタータップを用いることにより、再生信号のDCレベルは保持される。この

リミットイコライザの出力信号(z)は次式で現せる。

$$z = x + k \times [Limit(-y_1) + Limit(y_2) + Limit(y_3) + Limit(-y_4)] \quad (1)$$

ここで、

x: センタータップ信号、

k: FIRフィルタのタップ係数、

y_n: リミットイコライザの入力信号、

Limit(y_n): リミッターブロック後の入力信号

これより、xがゼロクロスサンプル値のとき、zはkの値によらず、略xを出力することになる。このようにセンタータップ信号がゼロクロスサンプルのときに式(1)の第2項を略ゼロにするために4タップのFIRフィルタを構成している。

このような動作により、リミットイコライザはディスクノイズの影響を抑圧し、SNRを改善する。但し、リミットイコライザは、上述のごとく非線形高域強調イコライザのため、周波数特性をもって評価することができない。

今回は2種類のシミュレーションを用いてリミットイコライザの性能を評価した。1つ目は、劣化要因として低周波数ノイズが加わった場合の個々のデータパターンのジッターとエラーレートを計算した。2つ目は劣化要因として、ランダムノイズとデフォーカスを加えた場

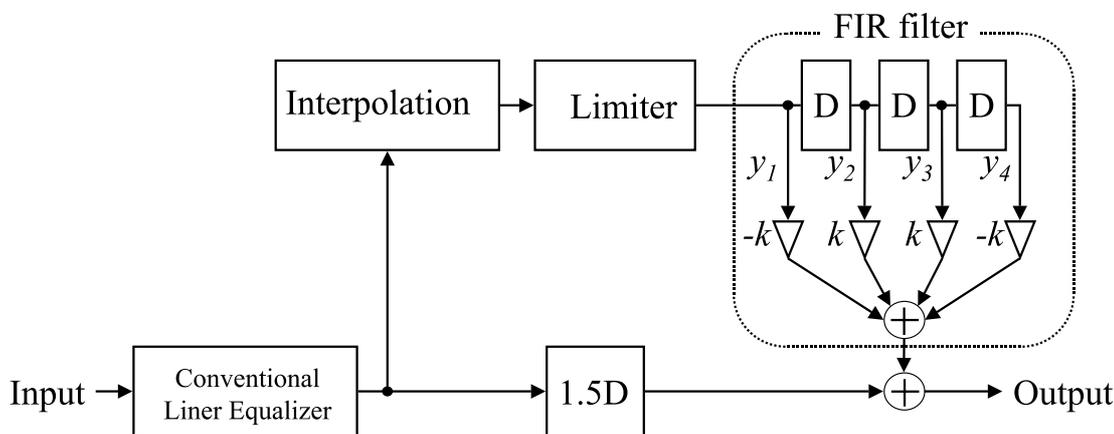


図1 Diagram of the limit equalizer in (1,7)RLL code.

合の個々のデータパターンにおけるジッターとエラーレートを計算した。ここでのデータパターンとは、Blu-ray ディスクフォーマットで採用されている(1,7)RLL 符号の隣接するビットとスペースのデータ長の組み合わせであり、そのデータパターンごとに分類している。

2. シミュレーション条件および結果

2.1 低周波数ノイズに対する効果

図2 に低周波数ノイズに対するシミュレーションフローを示し、シミュレーション条件を表1 に示す。(1,7)RLL 符号が取りえる2T から8T までのデータ(2 n, m 8)を使用し、"nT-mT" のようなデータパターンの組み合わせを使用した。NA0.85, 波長405nm のピックアップヘッドは20 タップのFIR フィルタでモデル化した。線密度は25GB の容量のとき0.112 μm/bit である。リミットイコライザの前段で用いるPre-EQ はタップ係数(-0.475, 1, 1, -0.475) の4 タップの線形イコライザを使用した。このタップ係数により、Tmin 周波数でのゲインは5.2dB となり、符号間干渉は最小となる。低周波数ノイズ加算はオフセットノイズ加算としてモデル化した。リミットイコライザはこのオフ

セットノイズの影響を抑制する。リミットイコライザのタップ係数(k)は0.0 ~ 2.0 の変数とした。ここで、k=0 のときリミットイコライザはイコライザとしての動作はせず、センタータップのみを出力するのでPre-EQ 出力の1.5 クロック遅延要素として動作する。リミットイコライザ後のDAC 出力について個々のデータパターンのエッジポジションシフト量とエラーを計算し、グラフ化した。ここで、エッジポジションシフト量の集合はジッターに相当する。

いくつかのシミュレーション結果を図3 に示す。図3(a)は"2T-5T" のデータパターンについて計算した結果である。エッジポジションシフト量がチャンネルクロック(Tw)の50%を超える場合はエラーが生じたことになり、エッジポジションシフト量が50%以下の場合には正しく再生されたことになる。この場合はエッジポジションシフト量自体(ジッター)を評価することになる。k=0 のとき、オフセットノイズレベルが0.16 以上で"2T-5T" のデータパターンは"1T-6T" のデータパターンとして読み間違い、再生信号としてはエラーを生じるが、k=1.0 のときには、オフセットノイズが0.32 までエラーは生じない。ここで、エッジポジションシ

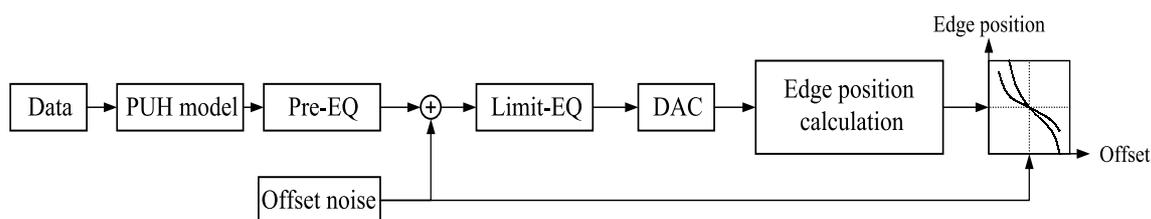


図2 Simulation flow in the case of low frequency noise, which is regarded as offset-noise, as a degradation factor.

表1 シミュレーション条件

Data	(1,7) RLL
NA	0.85
Wave length (λ)	405 nm
Liner density	0.112 μm / bit
Pre-EQ	4 Taps Cosine equalizer (-0.475, 1, 1, -0.475)
Limiter level	±0.25 (normalized by 0-peak)
Tap coefficient (k) of limit equalizer	0~2

フト量が50%となるオフセットノイズ量をオフセットノイズマージンと定義すると、リミットイコライザ使用により、このデータパターンに対してエラーレートを改善し、オフセットノイズマージンが広がる事が分かる。また見方を変えると、 $k=0$ のエッジポジションシフト量が50%となるオフセットノイズ量でも $k=1$ のときには、エッジポジションシフト量は14.4%にしかない。即ち、リミットイコライザにより、エッジポジションシフト量も改善する。しかし、オフセットノイズが -0.30 のときには k の値によらず、“2T-5T”のデータパターンを“3T-4T”と誤判定し、リミットイコライザ使用によるオフセットノイズマージンは広がらない。

図3(b)に“3T-4T”のデータパターンについてのシミュレーション結果を示す。(a)と同様に $k=0$ でのオフセットノイズが 0.36 以上のとき“3T-4T”のデータパターンは“2T-5T”のデータパターンとして誤判定され、 $k=1$ のときは、オフセットノイズは 0.43 以上のときに誤判定さ

れ、リミットイコライザによりオフセットノイズマージンは僅かに広がる。しかしながら、“3T-4T”のデータパターンが“4T-3T”のデータパターンと誤判定するオフセットノイズマージンは広がらない。このようにデータパターンごとにオフセットノイズマージンは変化することが確認できた。そこで、図4にデータパターンの各データ長ごとのオフセットノイズマージンを示す。2Tのデータ長を1Tのデータ長に誤判定する場合、 k が大きくなればなるほど、オフセットノイズマージンは広がり、 $k=1$ でのオフセットノイズマージンは $k=0$ の約2倍となる。ところが3Tのデータ長の場合、 k の値によってオフセットノイズマージンは広がるが、2Tのデータ長ほどマージンは広がらず、4T以上の場合においては、 k の値によってオフセットノイズマージンは変化しない。

これらの結果から、2Tのデータ長を1Tのデータ長に誤判定するようなオフセットノイズに対しては、リミットイコライザの使用によってジッターおよびエラーレートを大きく改善す

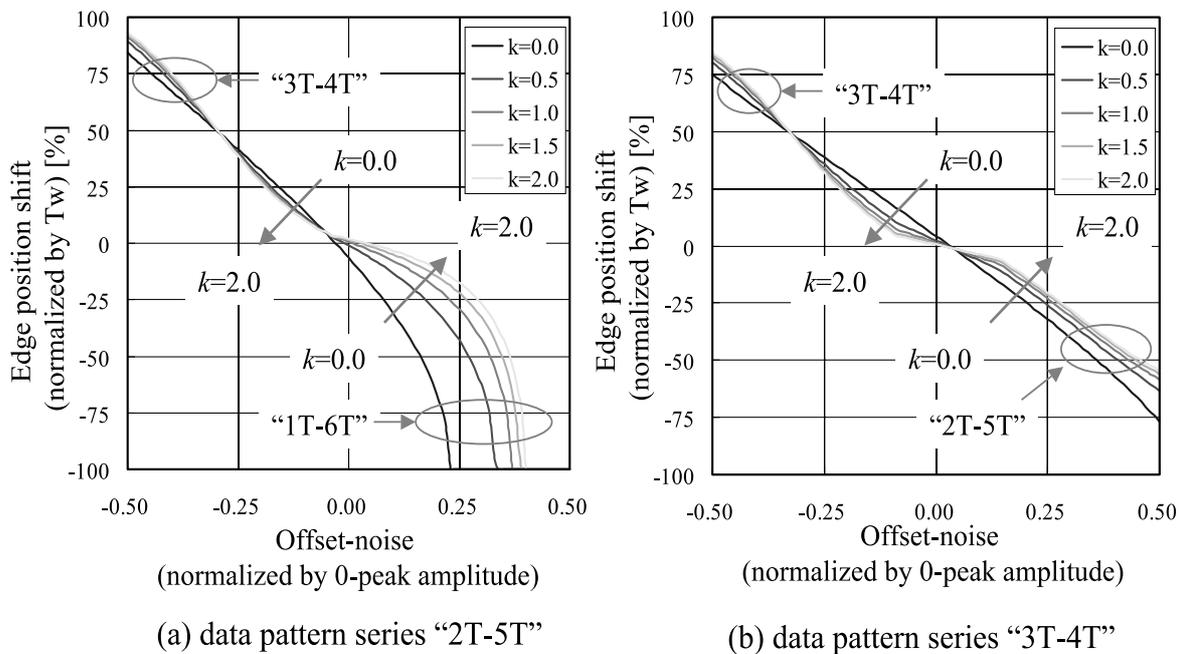


図3 (a)は2T-5Tのデータパターンにおけるエッジ位置シフトとオフセットノイズの関係、(b)は3T-4Tのデータパターンにおけるエッジ位置シフトとオフセットノイズの関係を示す。

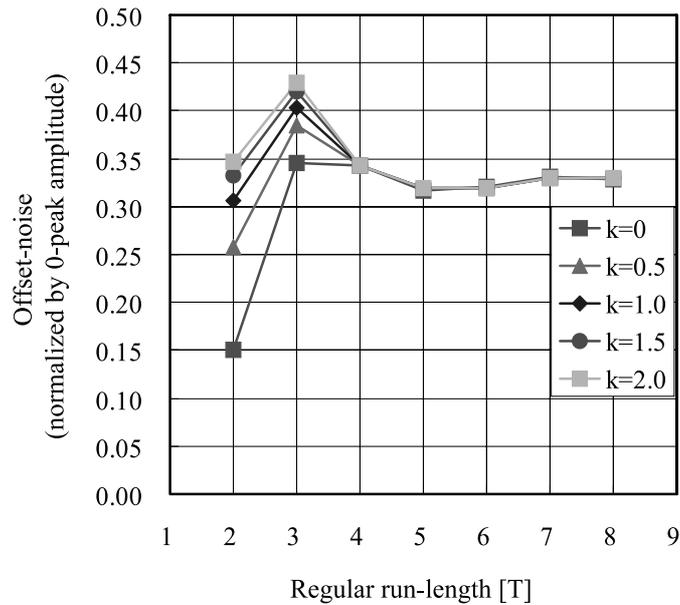


図 4 Margin against the offset-noise in each run-length. For instance, it is shown that 2T errs as 1T when regular run-length is 2T, 3T errs as 2T when regular run-length is 3T.

る。3T のデータ長を 2T のデータ長に誤判定するようなオフセットノイズに対しては、ジッターおよびエラーレートをわずかに改善し、4T 以上のデータ長に対しては改善も悪化もしないことが確認できた。

2.2 ランダムノイズ、デフォーカスに対する効果

図 5 にシミュレーションフローを表 2 にシミュレーション条件を示す。図 5 の 2 次元配列データは (1,7)RLL 符号の信号を生成し、再生信号はこのビット配列に Optical Transfer Function (OTF 特性) を適用し、計算した。劣化要因として、ランダムノイズとデフォーカスを考慮し、システムノイズとしてガウシアン白色雑音、ディスクノイズとしてガウシアン白色雑

音に OTF 特性を掛けたものを仮定する。ディスクノイズは OTF の周波数特性に比例し、OTF 特性はデフォーカスにより変化する。即ち、 T_{min} 近傍の周波数のゲインはデフォーカスによって減少する。(1,7)RLL 符号の再生信号にシステムノイズとディスクノイズを加え、符号間干渉を最小にする 4 タップの Pre-EQ を通り、リミットイコライザに入力される。ここで、リミット

表 2 シミュレーション条件

Data	(1,7)RLL
NA	0.85
Wave length (λ)	405 nm
Track pitch	0.32 μ m
Liner density	0.112 μ m / bit
Optical depth	$\lambda/10$

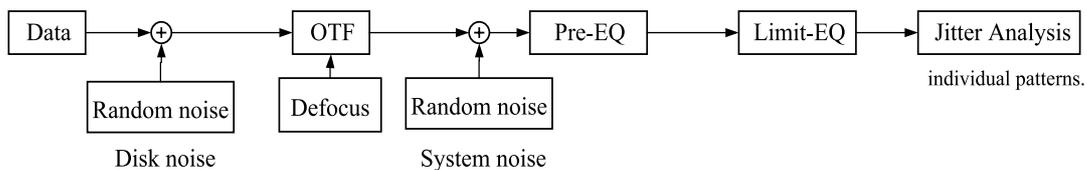


図 5 Simulation flow in the case of random noise and defocus as degradation factors.

イコライザのタップ係数(k)は1.0である。その後、我々が以前に開発したジッター解析を使用し、元データと比較することで各組み合わせのデータを分類し、ジッターとエラーレートを計算した。3つの条件下でランダムノイズ、デフォーカスに対するリミットイコライザの効果を計算した。1つ目は標準的な条件として、8T信号のCNRが54dBの場合である。2つ目はCNRが劣化した条件として、8T信号のCNRが44dBの場合である。3つ目はデフォーカスが加わった条件として、8T信号のCNRは54dBのときにデフォーカスが $0.3\ \mu\text{m}$ 加わった場合である。シミュレーション結果を図6～図11に示す。各図(a)はPre-EQのみを使用した場合のジッ

ターとエラーレートを示し、各図(b)はリミットイコライザを使用した場合のジッターとエラーレートを示し、各図(c)はPre-EQに対するリミットイコライザの改善度合いのジッターとエラーレートを示す。

図6は標準的な条件下でのPre-EQ, リミットイコライザのジッターとジッター改善度合いを示し、図7は標準的な条件下でのPre-EQ, リミットイコライザのエラーレートとエラーレート改善度合いを示す。図6, 図7より, Pre-EQ使用時の"2T-2T"の組み合わせはジッター, エラーレートともに最も悪い。これは,(1,7)RLL符号の中で, 2T信号振幅が最も小さいためである。また, Pre-EQは(1,7)RLL符号に最も多

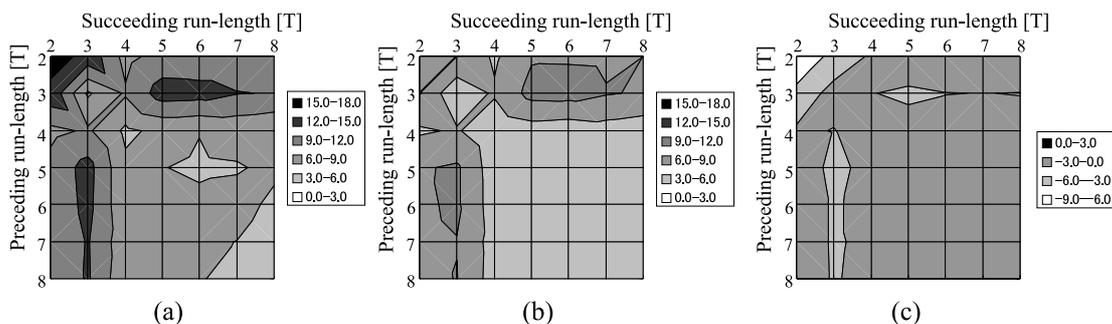


図6 When typical condition (CNR of 8T signal = 54 dB), (a) is the jitter (s/Tw) in the Pre-EQ use, (b) is the jitter in the limit equalizer use, (c) is the jitter improvement between the conventional equalizer and the limit equalizer.

The total jitter in all combinations of data pattern by using the Pre-EQ is 11.6%, and that by using the limit equalizer is 7.5%.

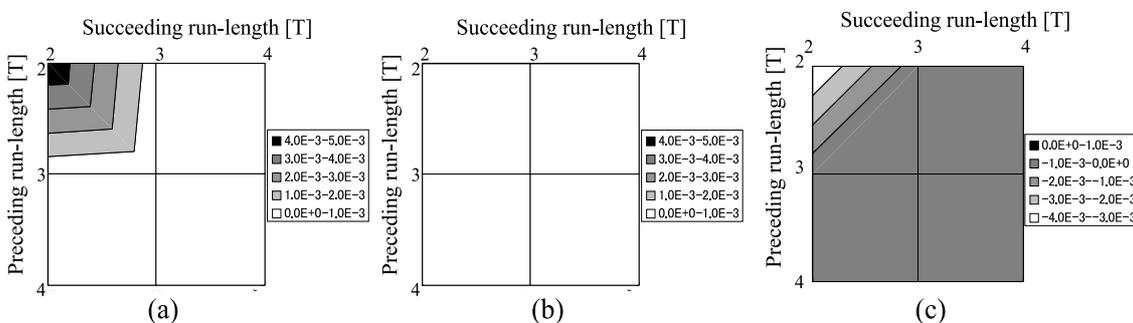


図7 When typical condition (CNR of 8T signal = 54 dB), (a) is the error rate in the Pre-EQ use, (b) is the error rate in the limit equalizer use, (c) is the error rate improvement between the Pre-EQ and the limit equalizer. The total error rate in all combinations of data pattern by using the Pre-EQ is 2.5×10^{-4} , and that by using the limit equalizer is no error.

く出現する2T信号を含む組み合わせの符号間干渉を最小にするように動作するため、2T信号を含む組み合わせより3T信号を含む組み合わせのジッターが相対的に劣化している。そして、リミットイコライザを使用することで2T信号や3T信号の短いTとの組み合わせのジッターを改善している。また、図6(c)より全ての組み合わせにおいてジッターは改善していることが分かる。図7より、Pre-EQ使用時のエラーレートは"2T-2T"の組み合わせで最も劣化しているが、リミットイコライザ使用時には全ての組み合わせにおいてエラーが起きていない。すなわち、標準的な条件下での全データパターンの組み合わせにおいて、リミットイコライザ使

用によりエラーレートは改善することが確認できた。

図8にCNR劣化時のジッターおよびジッター改善度合い、図9にエラーレートおよびエラーレート改善度合いを示す。CNR劣化に伴いPre-EQ使用時の全組み合わせのジッターとエラーレートは悪化し、さらに短いTを含む組み合わせにおいてはジッターとエラーレートの劣化度合いは際立っている。CNR劣化により図6、図7と比較し、図8、図9のジッターとエラーレートの改善度合いは、リミットイコライザを使用しても減少している。それでもなおリミットイコライザを使用することでジッターとエラーレートは改善することが図8(c)と図9(c)から

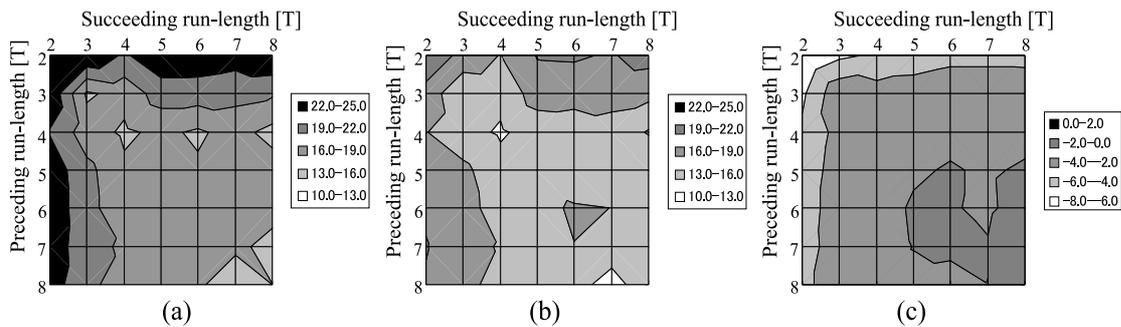


図8 When decline of CNR (CNR of 8T signal = 44 dB), (a) is the jitter in the Pre-EQ use, (b) is the jitter in the limit equalizer use, (c) is the jitter improvement between the Pre-EQ and the limit equalizer. The total jitter in all combinations of data pattern by using the Pre-EQ is 23.3%, and that by using the limit equalizer is 17.3%.

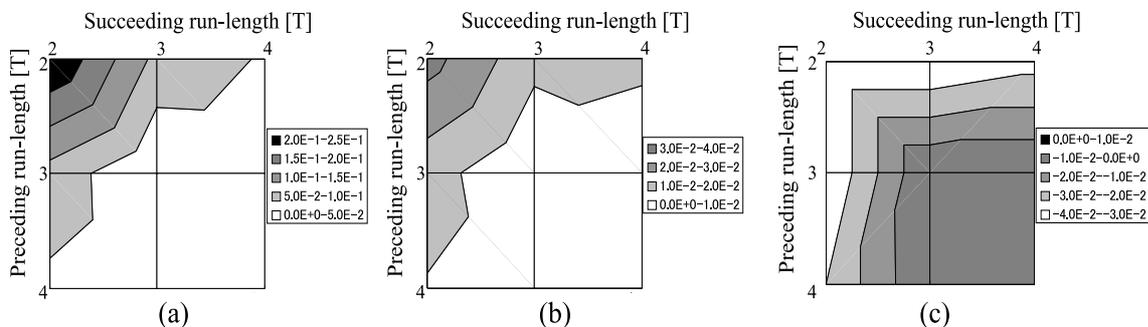


図9 When decline of CNR (CNR of 8T signal = 44 dB), (a) is the error rate in the Pre-EQ use, (b) is the error rate in the limit equalizer use, (c) is the error rate improvement between the Pre-EQ and the limit equalizer. The total error rate in all combinations of data pattern by using the Pre-EQ is 2.0×10^{-2} , and that by using the limit equalizer is 3.6×10^{-3} .

分かる。

デフォーカス時のジッターおよびジッター改善度合いを図10に、エラーレートおよびエラーレート改善度合いを図11に示す。デフォーカス時には他の条件と比較してジッターとエラーレートに特異点がある。2Tと短いTの組み合わせ("2T-shorterT")よりも2Tと長いTの組み合わせ("2T-longerT")がジッター、エラーレートともに悪化している。これは"2T-shorterT"よりも"2T-longerT"の方が、デフォーカスにより符号間干渉の影響を受けやすいためと考えられる。また、リミットイコライザを使用することでジッターとエラーレートは改善することが分かる。さらに、全組み合わせ

において、ジッターとエラーレートの相関があることが以上の結果より明らかになり、全組み合わせにおいて、リミットイコライザを使用することでジッターとエラーレートが改善することが確認できた。

3. まとめ

我々は2種類のシミュレーションにより(1,7)RLL符号でのリミットイコライザの性能を個々のデータパターンごとに検証した。

1つは、シミュレーション上は低周波数ノイズとしてオフセットノイズを加えた場合のジッターとエラーレートをデータパターンごとに解析し、リミットイコライザを使用することによ

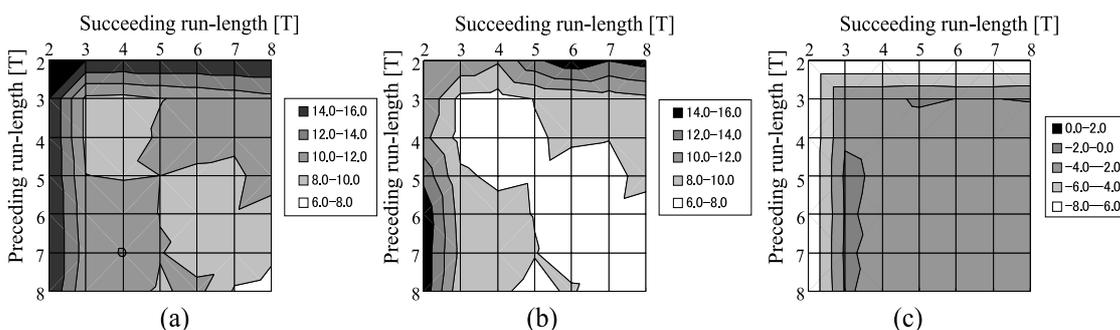


図10 When additional defocus (CNR of 8T signal = 54 dB, defocus = 0.3mm), (a) is the jitter in the Pre-EQ use, (b) is the jitter in the limit equalizer use, (c) is the jitter improvement between the Pre-EQ and the limit equalizer. The total jitter in all combinations of data pattern by using the Pre-EQ is 19.1%, and that by using the limit equalizer is 10.5%.

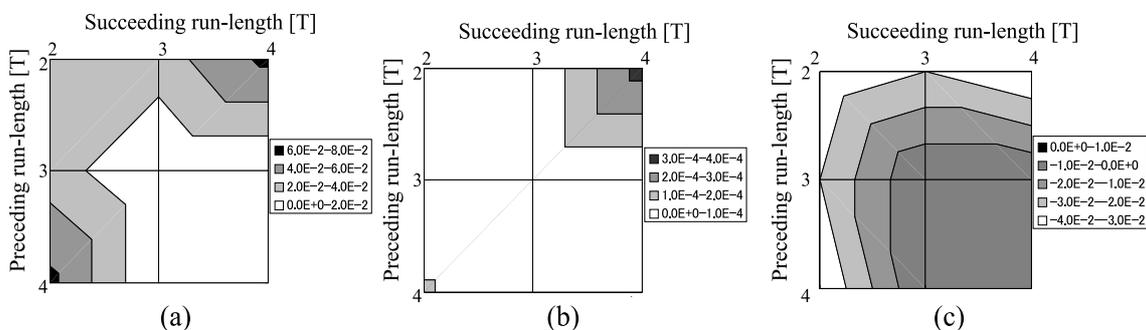


図11 When additional defocus (CNR of 8T signal = 54 dB, defocus = 0.3 mm), (a) is the error rate in the Pre-EQ use, (b) is the error rate in the limit equalizer use, (c) is the error rate improvement between the Pre-EQ and the limit equalizer. The total error rate in all combinations of data pattern by using the Pre-EQ is 8.8×10^{-3} , and that by using the limit equalizer is 1.8×10^{-5} .

り，2T 信号が 1T 信号と誤判定するようなエラーとジッターは非常に改善することが確認できた。3T 信号が 2T 信号と誤判定するようなエラーとジッターはわずかに改善し，それ以外の信号に対しては，リミットイコライザを用いることにより，劣化も改善もしないことが確認できた。

次に，ランダムノイズとデフォーカスを劣化要因とした場合のジッターとエラーレートを個々のデータパターンごとに検証した。これより，全データパターンでのジッターとエラーレートが改善できることを確認し，特に 2T 信号を含むデータパターンについてはジッターとエラーレートを非常に改善することが分かり，3T 信号以上の組み合わせについては，全く劣化しないことが確認できた。

以上より，リミットイコライザは低周波数ノイズやランダムノイズに対してジッター，エラーレート共に全てのデータパターンにおいて決して劣化することは無く，特に短い T を含む信号に対しての改善度合いは非常に大きいことを検証できた。

参 考 文 献

- [1]S.Miyanabe,H.Kuribayashiand K.Yamamoto:
Jpn.J.Appl.Phys.38(1999) 1715.

筆 者

小 林 秀 樹 (こばやし ひでき)

所属：総合研究所光技術システム研究部

入社年月：1992 年 4 月

主な経歴：光ディスクシステム信号処理の研究開発に従事。