

ADF7020、ADF7020-1、ADF7021、ADF7025 に対する クロックおよびデータ・リカバリ処理

著者 : Austin Harney、Philip Quinlan

はじめに

ADF7020、ADF7020-1、ADF7021、ADF7025 デバイスのクロックおよびデータ・リカバリ (CDR) モジュールは、オーバーサンプリングされたデジタル・フェーズ・ロック・ループ (DPLL) を使用し送信データレートの 32 倍で動作します。CDR の PLL は、受信したビット・ストリームを、ローカルビット・クロックである Rx クロックに再同期します。

DPLL の位相検出器は、再生されたビット・ストリームのビット遷移とローカルビット・クロックの立上がりエッジの時間差を比較することにより位相誤差を測定します。数値制御発振器 (NCO) は、再生されたクロックを生成します。後段復調器の出力においてビット遷移が検出されると、NCO 出力の位相は、ビット時間の $+1/32$ 、 0 、または $-1/32$ だけ調整されます。

図 1 に、CDR の簡略ブロック図を示します。

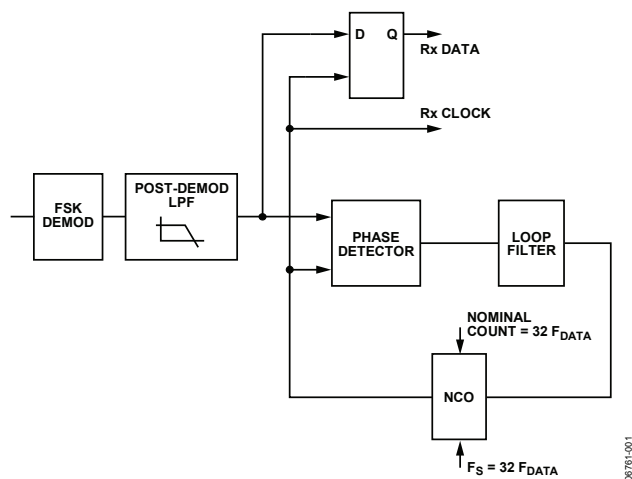


図 1. シンボル・タイミング再生 PLL のブロック図

データレート許容度の最大化

CDR のデータレート許容度は、送信ビット・ストリーム内のビット遷移の数に依存します。最大の遷移ビット・パターン (10101010...) がプリアンブルとして使用されると、この許容度は最大化され、CDR のロック時間は最小化されます。1 つのビット周期では、ビット周期の $1/32$ という最大 NCO 位相調整が許容されます。したがって、101010... のプリアンブルでは、 $1/32 \times 100 = \pm 3.13\%$ という最大のデータレート許容度が得られます。

しかし、ビット遷移の定期的な発生が保証されないデータ・フィールドでは、このデータレート許容度は低下します (図 2 を参照)。一般に、CDR の実際のデータレート許容度は、送信データ・フィールドのランレングス制限 (RLL) 特性によって決まります。

符号化ビット・ストリーム内の同一の連続ビットの最大数は、コードの RLL 特性によって定義されます。一般に、すべての符号化方式は (d, k) 制約によって定義されます。ここで、d、k は、等しくないシンボル間での同一のシンボルの最小数と最大数を表します。

一例として、コードの (d, k) が (0, 4) となる場合は、連続した同一ビットは 4 つ以下です。一般に、最大のデータレート許容度は、データ・フィールドのエンコーディングに使用するコードの k 制約によって決まります。

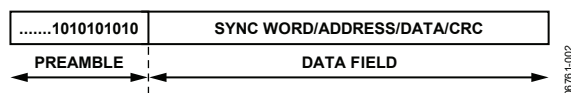


図 2. 代表的なメッセージ・フォーマット

一例として、マンチェスター符号化方式には、2 ビットの最大 RLL があります。つまり、符号化されたマンチェスター・シーケンス内の連続ビットの最大数は 2 ビットです。たとえば、マンチェスター・エンコーダの入力コード・ワードが 0101 であれば、入力データレートの 2 倍の 01100110 が出力コード・ワードになります。したがって、最大許容度はマンチェスター符号化された出力レートの $\pm 3.125\%/2 = \pm 1.56\%$ になります。しかし実際には、マンチェスター・エンコーダ出力での平均 RLL が 2 未満であるため、許容度はこれより大きくなります。シミュレーションによれば、ランダムな入力バイナリ・ビット・シーケンスが与えられた場合は、マンチェスター符号化方式を使用して約 $\pm 2\%$ のデータレート許容度に対応できます。

データレート許容度の最大化に使用できる、もう 1 つの低複雑性符号化方式は、送信ビット・ストリーム内に一定の時間間隔で追加のデータビットを挿入して、一定の最大 RLL を保証するというものです。これはビット・スタッフィング・コードと呼ばれます。

この方式の利点は、実装が簡単であることに加え、符号レートが $1/2$ であるマンチェスター符号化方式の場合と異なり、高い符号レート損失に悩まされることがないという点です。

目次

はじめに.....	1
データレート許容度の最大化.....	1
ランレングス制約の最大化.....	3
総括.....	3

表1は、これらの符号化方式のデータレート許容度をまとめたものです。8/9 レート符号や 8/10 レート符号など、その他の高レート符号では、ハードウェアやソフトウェアの複雑性が増えることを考慮する必要があります。

表 1. DPLL の周波数トラッキング・レンジ

Data Encoding Scheme	Tolerance
1010101... Preamble	±3.125%
Manchester Code, Max RLL = 2, Random Input Data	±2.00%
Bit Stuffing Code with RLL = 3, Random Input Data	±1.60%

ランレングス制約の最大化

ワイヤレス・ストリーミングなどのアプリケーションや、大規模なパケットベース・プロトコルが使用される場合は、データ・フィールドでの有限な RLL 制約を保証して適切な CDR 処理に対応するために、何らかのデータ符号化が要求されます。

しかし、データレート許容度とパケット・サイズが最小限に抑えられた場合は、符号化されていないデータ・フィールドを許容することも、大きな RLL 符号化制約を持つデータ・フィールドに対応することも可能です。これは、データ・ペイロードが一般に 64 バイト未満である、パケットベースのワイヤレス・センサ・テレメトリ・アプリケーションでは一般的です。さらに、データレート許容度は、送受信水晶発振器のマッチングによって設定されるため、通常、厳しく制限されています。したがって、データレートが水晶発振器の周波数の整数分の一に正しく選択された場合は、±50 ppm または 0.005% の公称周波数誤差よりも改善されるのが普通です。

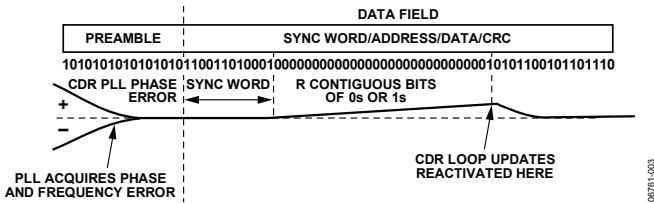


図 3. 符号化されていないデータ・フィールドの位相誤差軌跡

一例を図 3 に示します。101011010... のプリアンプルを使用することで、高速なビット同期を達成し、Tx と Rx のデータレート差によって発生する周波数誤差を追跡します。プリアンプルの最後では、同期ワードの再生と同時に、CDR が位相誤差と周波数誤差の追跡を続行します。同期ワードに続くゼロの長いシーケンスは、CDR が周波数誤差の追跡を許すためのシンボル遷移を認識しないことを意味します。この間、CDR の位相誤差は、送信ビット・ストリームにおいて別のデータ遷移が発生するまで、単調に増加（周波数誤差の符号によっては減少）します。

このシナリオでは、最大位相誤差がビット周期のおよそ±10%以内にとどまる限り、CDR は依然としてデータを再生できます。CDR 位相誤差の増加率はデータレート許容度に比例するため、長い RLL 値への対応が要求される場合は、これを最小限に抑えることが重要です。したがって、このような状態で PLL の位相累算を制限するためにデータレート許容度やパケット・サイズが最小限に抑えられる場合は、大きな RLL 制約を受け入れることができます。

データレート許容度と RLL 制約との関係は、次式から確立できます。

$$Phase = 2\pi Ft$$

$$\frac{\Delta\Phi}{360} = \Delta F \Delta t$$

ここで、 Δt は連続データビットの数 (R) に基づいて定義されます。

位相累算がビット周期の 1/10 に制限される場合は、

$$0.1 = \Delta F_{DATA} R T_{bit}$$

ここで、 $T_{bit} = 1/F_{DATA}$

したがって、

$$0.1 = \left(\frac{\Delta F_{DATA}}{F_{DATA}} \right) R$$

所定のデータレート許容度 ($\Delta F_{DATA}/F_{DATA}$) に対して、許容できる同一の連続データビットの数 (R) は、次式になります。

$$R = \left(\frac{F_{DATA}}{\Delta F_{DATA}} \right) 0.1$$

表 2 は、制約長 R とデータレート許容度との関係を示す例です。

表 2. 制約長 R とデータレート許容度

Data Rate Tolerance % ($\Delta F_{DATA}/F_{DATA}$)	$F_{DATA}/\Delta F$	R Bits
0.1%	1000	100
0.05%	2000	200
0.01%	10,000	1000

この解析では、R 個の連続データビットが、パケットの分離されたセグメントにおいて発生するものと想定します。このようなビット・パターンが、連続データのバーストの合間に CDR による位相誤差の完全なリカバリを許さない可能性のある、ランダムなデータビットのショート・ランによって分離される場合を考えてみます。このような場合は、RLL 制約は結合バーストの合計長であると想定し、この増加した R 値に基づいてデータ許容度条件（つまり、Tx と Rx Xtal のマッチング条件）を計算するのが最善です。

RLL が未知である場合や、データ・フィールドが符号化されておらず、パケット全体が連続データビットを持つことができる場合は、データ許容度条件は、合計パケット長 (R = 合計パケット長) と等しい RLL 値に基づく必要があります。

一般に、連続データの長いビット・パターンを分割およびランダム化する技術としては、パケット・スクランブルをご検討ください。

総括

数十 kB の情報が無線送信されることのあるストリーミング・アプリケーションでは、何らかのデータ符号化を使用して RLL を最小限に抑えるとよいでしょう。これによって、たとえ連続した 1 または 0 の長い文字列が存在する状態でも、CDR 回路は着信データをうまく追跡できます。

たとえば、バースト性のあるパケットベースのシステムでは、ペイロードは一般に 64 バイト未満であり、CDR_CLK と $32 \times$ DATARATE との間の公称 CDR 周波数誤差が最小限に抑えられる場合は、CDR は 1 または 0 の長い連続文字列を許容できます。

それには、DATARATE が水晶発振器周波数の整数分の一となるように、DATARATE と水晶発振器の適切な組合せを選択することが最善の方法です。たとえば、9.6 kbps の DATARATE に対し

て CDR 周波数誤差を最小限に抑えるには、11.0592 MHz の水晶発振器が適切です。その場合の公称周波数誤差は、送受信水晶発振器間の周波数誤差のみであり、一般には ± 50 ppm または 0.005% の公称周波数誤差よりも改善されます。この周波数誤差では、2000 個の連続ビットが許容されます。あるいは、12 MHz の水晶発振器では、2.2% に近い公称周波数誤差が得られるため、わずか 2 ビットの最大 RLL が得られます。