

Tektronix®

オシロスコープを使用した USB 2.0問題のトラブルシューティング

アプリケーション・ノート



はじめに

USBをベースとしたシステムは身の回りに数多くあり、製品内の内部接続で使用される組込みシステムや、コンピュータと周辺機器を接続するための一般的な外部接続があります。USBインタフェースの大きな利点は、ホスト・デバイスから周辺デバイスに電源を供給できることです。

Universal Serial Bus (USB) は今日のパーソナル・コンピュータ (PC) の主流なインタフェースになっており、それまでの外部シリアル/パラレル・バスと置き換わっています。1995年に登場して以来、USBは元々のPC用途以外にも使用されるようになり、さまざまな種類の電気デバイスで数多く使用されるようになりました。

USBは、システム間通信だけの拡張にとどまりません。例えば、チップ間通信ではIC_USB (Inter-Chip USB) とHSIC (High-Speed Inter-Chip) が使われます。

USB 2.0は成熟した規格であり、ビルディング・ブロックの多くは強固です。しかし、このバスはノイズ、基板レイアウト、終端などの要素によって影響を受けることがあります。通信障害が発生した場合、まずオシロスコープを使用してタイミングと振幅の情報を調べ、デコード機能がある場合はプロトコル診断のための情報を調べます。

USBバスが正しく動作している場合でも、特定の条件でシステムに問題が発生することがあります。このような場合、特定のUSBバスの値でトリガすることで重要な時間基準が得られ、システムレベルのバグのトラブルシューティングに役立ちます。

本アプリケーション・ノートの概要

- USB 2.0の物理レイヤとパケット構造の概要から、トラブルシューティングに役立つ詳細な情報を説明します。
- USB 2.0のデコード機能を装備したオシロスコープのデコード設定方法を説明します。
- USB 2.0のデコード機能を装備したオシロスコープのシリアル・バス・データの読み方を説明します。
- USB 2.0のデコード機能を装備したオシロスコープで可能なトリガ、検索について説明します。

テクトロニクスのおシロスコープにシリアル・トリガ/解析のオプション機能を装備すると、USB 2.0バスに携わる組込みシステム・エンジニアのための強力なツールになります。このアプリケーション・ノートでは、5シリーズMSOを使用してUSBシリアル・バスのデコードとトリガを説明します。

サポート可能なシリアル・バス規格は、オシロスコープによって異なります。オシロスコープでサポートされるバスの詳細については、付録または当社ウェブ・サイト (jp.tektronix.com) をご覧ください。

USB 2.0

概要

2000年に発表されたUSB 2.0の仕様は、今日使われているほとんどのUSBデバイスに対応しています。USB 1.1仕様から進化したUSB 2.0仕様では、USB 1.1仕様でサポートされたロースピードとフルスピード・インタフェースに、新たにハイスピード・インタフェースが追加されました。USB 2.0仕様の補則では、IC_USB、HSIC、その他の機能強化が図られています。

USB 3.0仕様は、2008年に発表されました。USB 3.0はSuperSpeed USBとも呼ばれ、転送速度はUSB 2.0の10倍になっています。SuperSpeed USBは、USB 2.0デバイスの下位互換性をとっています。2013年には、USB 3.0仕様に10Gbpsを加えたUSB 3.1仕様が発表されました。5GbpsをGen 1、10GbpsをGen 2としています。USB 3.0/3.1はUSB 2.0に加えられる仕様であり、USB 2.0と置き換わるものではありません。SuperSpeed USBのデバイスは、USB 2.0デバイスのフレームワーク・コマンドとデスクリプションを満足する必要があります。

USB-IF (USB Implementers Forum) がUSBの規格と技術を管理、運営しています。USBの仕様は、USB-IFのウェブ・サイト (www.usb.org) で確認することができます。

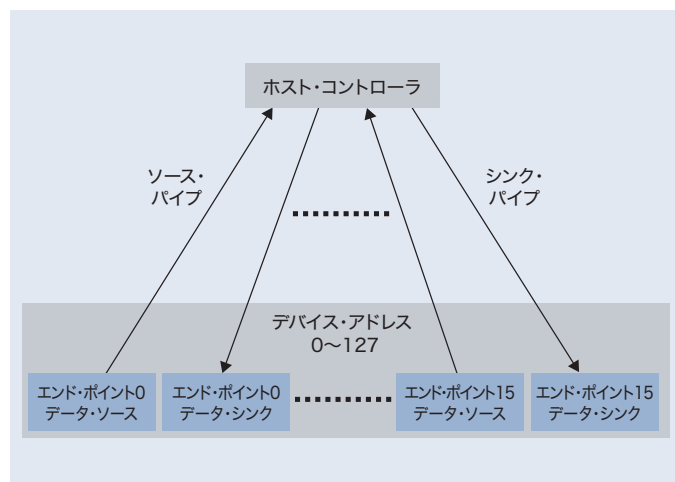
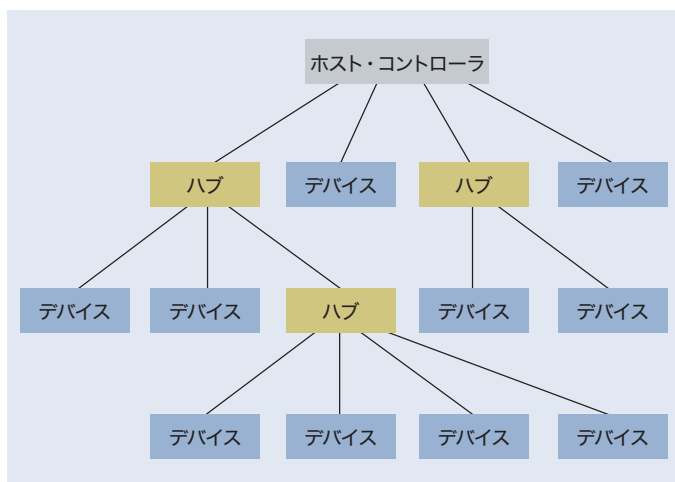
動作原理

USBの速度	ビット・レート	ビット周期
Low-Speed USB 2.0	1.5Mbps	667ns
Full-Speed USB 2.0	12Mbps	83.3ns
High-Speed USB 2.0	480Mbps	2.08ns
SuperSpeed USB 5Gbps (USB 3.0/USB 3.1 Gen 1)	5Gbps	200ps
SuperSpeed USB 10Gbps (USB 3.1 Gen 2)	10Gbps	100ps

USBには4種類の速度があります。ハイスピード・デバイスはフルスピードで開始し、その後ハイスピードに移行します。USB 2.0では、ホスト・コントローラに接続されている最も遅いデバイスによって転送速度は制限されます。

SuperSpeed USBでは2種類のホスト・コントローラが使用され、1つはSuperSpeed USBデバイス用に、もう1つはUSB 2.0デバイスで使用されます。USB 2.0のシステムと同様、USB 3.0/3.1デバイスの速度は最も遅いデバイスによって制限されます。

テクトロニクスのおシロスコープには、USBのシリアル・トリガ／解析機能を持ったものがあります (付録Aを参照)。すべてのおシロスコープ・モデルで、ロースピードおよびフルスピードUSBのトリガ、デコード、サーチが実行できます。ハイスピードUSB信号は、1GHz以上の帯域を持ったおシロスコープが必要です。



USBのネットワークは、1台のホスト・コントローラと1~127台のデバイスで構成されます。USBはツリー型トポロジであり、オプションのハブでさらに拡張することができます。ホストのみがマスタとなり、すべてのバス・トラフィックを制御します。ホストはすべての通信とデバイスを初期化し、デバイスはホストに対して割り込むことはできません。

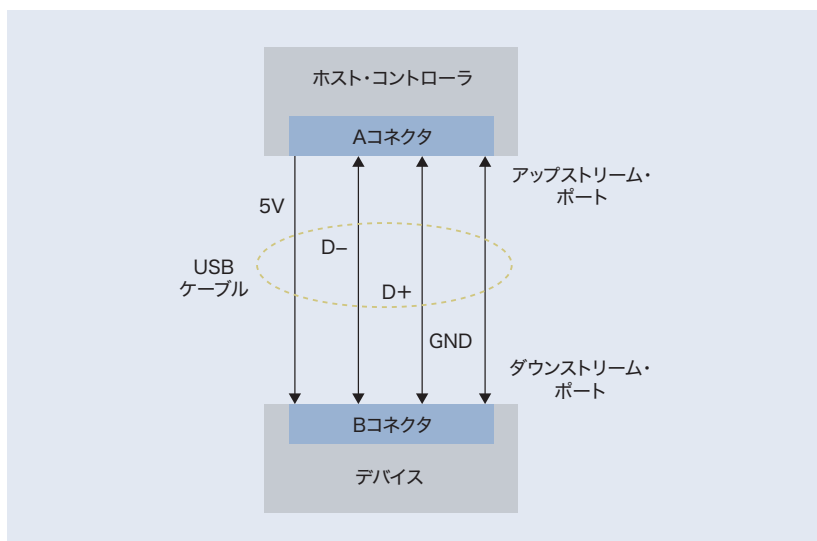
各デバイスは、最大16のデータ・エンドポイントを持つことができます。デバイス・エンドポイントは論理的な通信経路で、データを送信するデータ・ソースになったり、データを受信するデータ・シンクになったりします。エンドポイント0は必須であり、ホストがデバイスと通信するために使用されます。パイプは、デバイスのエンドポイントとホストのアプリケーション・ソフトウェア間を結ぶ論理的な接続のことです。

USBネットワークの接続は、電源投入時またはデバイスがホットプラグされる際に発生するコンフィグレーション・プロセスであるエニュメレーション時に動的に設定されます。以下のようなシーケンスになります。

1. ホストがUSBバス上にデバイスを認識する。
2. アドレス0、エンドポイント0のSETUPトークン (パケット) でデバイスをポーリングする。
3. デバイスをユニークなアドレス1~127にアサインする。
4. ホストはデバイスの速度とデータ転送タイプを識別する。
5. デバイス・クラスを決定する。デバイス・クラスでは、プリンタ、マス・ストレージ、ビデオ、オーディオ、ヒューマン・インタフェースなどのデバイスの機能が定義される。

電氣的構成

ホストは、アップストリームでAコネクタを、デバイスはダウンストリームでBコネクタを使用します。それぞれのコネクタには、標準、ミニ、マイクロという3種類の形状があります。2014年に発表されたタイプCではどちらも同じCコネクタを使用します。USB 2.0のケーブルは4線で構成され、2本は、ホストからの電源 (5V (赤) とグラウンド (黒)) を供給します。コネクタは、電源とグラウンドのピンがデータ・ピンより先に接続するように設計されています。ホストは、パワー・マネージメントによって100mAから500mAまでの電流を供給します。例えば、デバイスへの電力はホストまたはハブでモニタされており、過電流になると電力は切り離されます (なお、タイプCでは標準で3Aまでの電流を給電可能、さらに2012年に発表されたUSB PDでは最大100Wの電力を給電可能な他、受給電の向きを反転させることもできます)。



Data + (D+緑) とData - (D-白) のツイスト差動ペア線はホストによって制御され、半二重差動シグナリングにより双方向通信で使用されます。オシロスコープは、受動プローブまたはアクティブ・アナログ・プローブ、またはデジタル・ロジック・プローブでそれぞれの信号を取込むことができます。

シグナリング

USBの速度	ロー・ステート	ハイ・ステート
Low-Speed	<0.3V	>2.8V
Full-Speed	<0.3V	>2.8V
High-Speed	0V±10mV	400mV±10%

ロースピードとフルスピードのデバイスでは、電圧レベルは名目上等価ですが、ハイスピード・デバイスでは非常に低くなっています。デバイスが接続されていない場合は、ホストはD+とD-の両方をプルダウンします。これを、シングルエンドゼロ (SE0) ステートと呼びます。デバイスがバスに接続されると、プルアップ抵抗がデバイスの初期速度を示します。

データ・ステート	差動電圧
Jステート	ロースピード・デバイス： D-をプルアップし、負の差動電圧になる
	ハイ/フルスピード・デバイス： D+をプルアップし、正の差動電圧になる
Kステート	ロースピード・デバイス： D+をプルアップし、正の差動電圧になる
	ハイ/フルスピード・デバイス： D-をプルアップし、正の差動電圧になる

データ伝送では、NRZI (Non Return Zero Inverted) 符号化方式と、J、Kと呼ばれる2種類のデータ・ステートを使用します。Jステート、Kステートを表す差動電圧は、ロースピードとフルスピードのデバイスで正負が逆転します。ステートが変化しない期間を制限するトランジション数を少なくするため、規格ではビット・スタッフィングが必要になります。LSB (Least Significant Bit) が最初に送られ、MSB (Most Significant Bit) が最後に送られます。

パケット

パケットは、USB通信の基本単位です。パケットは、SYNCフィールド（SYNC）で始まり、パケット識別子（PID）が続きます。PIDに続くフィールドは、パケットの種類（フレーム開始パケット、トークン・パケット、データ・パケット等）によって異なります（ハンドシェイク・パケットの場合はフィールドがありません）。エンドオブパケット（EOP）でパケットを終了します。



Jのアイドル・ステートに続いて、ロースピードとフルスピードではパケットは8ビットのSYNCフィールドが始まります。SYNCは3つのKJペアであり、その後2つのKが続きます。

ハイスピードのSYNCフィールドでは15のKJペアの後に2つのKが続きます。ハブではSYNCフィールドを減らすことが許されており、最小で5つのKJペアと2つのKになることがあります。

PIDは2番目のパケット・バイトであり、4ビットのPIDと、エラー・チェックのための反転した4ビットPIDからなります。PIDの4ビット・パターンにより、17種類のパケットを区分します。パケットは、トークン、データ、ハンドシェイク、スペシャルの4つのグループに分けられます。

最初のPIDの4ビットが後の反転した4ビットと一致しない場合、PIDの符号化エラーとなります。LSBが最初に、MSBが最後にバス上に送られます。

EOP (End Of Packet) は3ビットからなり、2ビットのSE0と1ビットのJステートで構成されています。

USBパケットのタイプ	パケット	バイナリ値
トークン	OUT	0001
	IN	1001
	SOF	0101
	SETUP	1101
データ	DATA0	0011
	DATA1	1011
	DATA2	0111
	MDATA	1111
ハンドシェイク	ACK	0010
	NAK	1010
	STALL	1110
	NYET	0110
スペシャル	PRE	1100
	ERR	1100
	SPLIT	1000
	PING	0100
	Reserved	0000

ハンドシェイク・パケット

SYNC	PID	EOP
------	-----	-----

データ・パケットが正常に受信されたときに送られるACKや、データ・パケットを受信できないときに送られるNAKなどのハンドシェイク・パケットは、シンク・バイト、PIDバイト、EOPで構成されます。

トークン・パケット

SYNC	PID	11-BIT ADDRESS	5-BIT CRC	EOP
------	-----	----------------	-----------	-----

常にホストに送られるトークン・パケットは、SYNC、PID、および11ビットのアドレス、5ビットのCRC (Cyclic Redundancy Check) からなる2バイトとEOPで構成されます。

OUT、IN、SETUPトークンの11ビット・アドレスは、7ビットのデバイス・アドレスと4ビットのエンドポイント識別子に分かれています。

アドレス0は特殊な用途であり、ホストがデバイスにアドレスを指定するエnumレーション・プロセスの始めではデバイスのアドレスは割り当てられていません。エnumレーション・プロセスの後半において、ホストはデバイスにゼロでないアドレスを割り当てます。

すべてのデバイスはエンドポイント0を持っています。エンドポイント0はデバイスの制御とステータスで使用されます。他のエンドポイントは、データを転送するデータ・ソース、データを受信するデータ・シンクで使用されます。

ホスト送信の場合は、デバイスに対してまずOUTトークンを送り、データ・パケットを送ります。受信の場合、ホストがデバイスにINTトークンを送り、それに反応したデバイスからのデータ・パケットまたはNAKなどのハンドシェイク・パケットを受け取ります。

データ・パケット

SYNC	PID	DATA	16-BIT CRC	EOP
------	-----	------	------------	-----

データ・パケットは、PIDバイト、データ・バイト、16ビットのCRCとEOPで構成されます。

DATA0とDATA1というパケットがあり、それぞれ1と0にトグルできる1ビットのシーケンスの番号を持っています。シーケンス番号は、停止や再送信の自動要求待ちに使用されます。パケットDATA0とパケットDATA1は、転送が正常に行われると交互に切り替わります。転送エラーが発生すると、データ・パケットは同じシーケンス番号で再送されます。

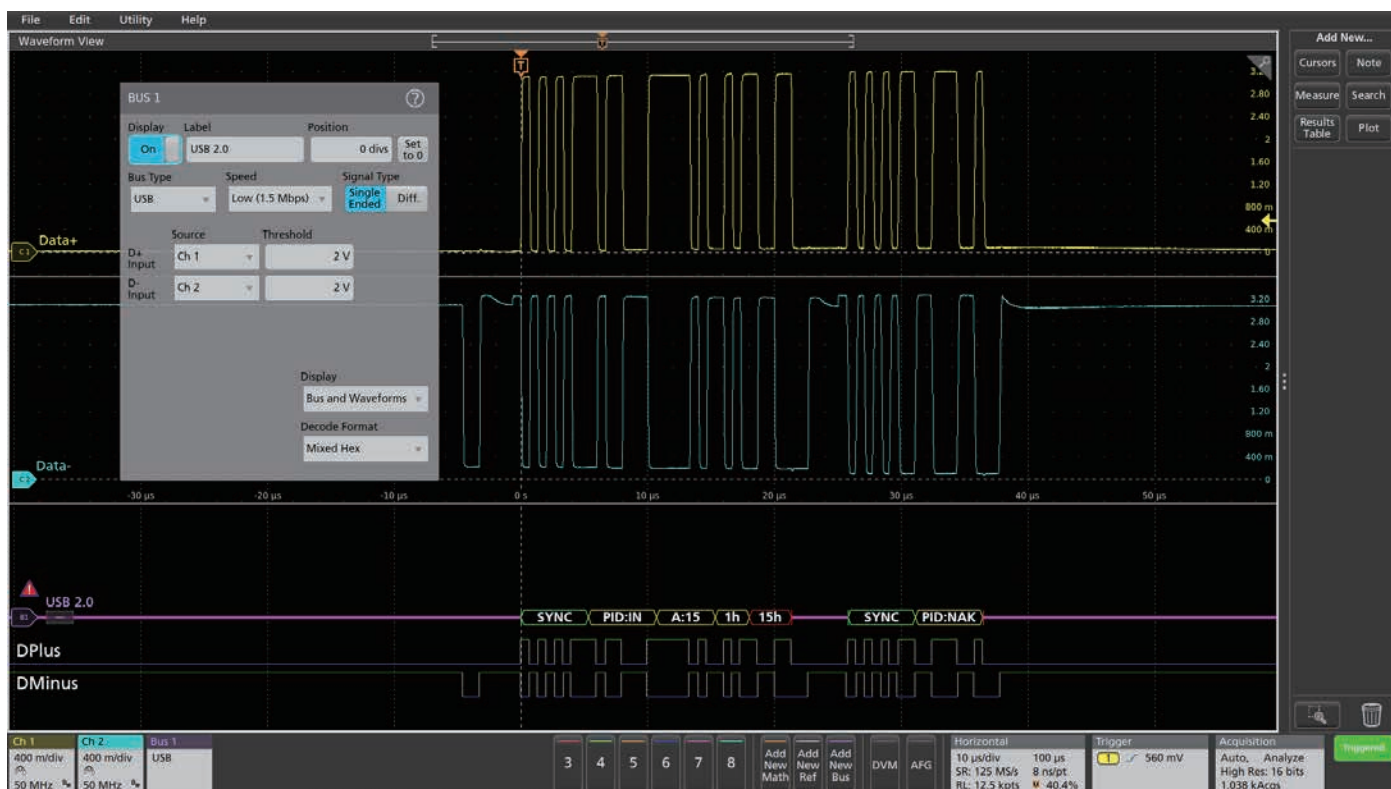
正常なデータ転送においては、ホストがデバイスにDATA0パケットを送り、デバイスがハンドシェイクACKパケットを返し、続いてホストがDATA1パケットを送ることになります。

ホストがデバイスからのハンドシェイクACKパケットを受信しないか、またはNAKパケットを受信した場合、ホストはDATA0パケットを再送します。デバイスがACKパケットを送り、ホストの使ったシーケンス番号と同じシーケンス番号でデバイスがデータ・パケットを受信した場合、デバイスはデータ・パケットを認識し、古いデータは無視します。

SOF (Start Of Frame)

SYNC	PID	FRAME NUMBER	5-BIT CRC	EOP
------	-----	--------------	-----------	-----

SOFは非同期データと同期をとるために使用されます。11ビットのフレーム番号は、SOFパケットが送信されるたびに1ずつ増えます。



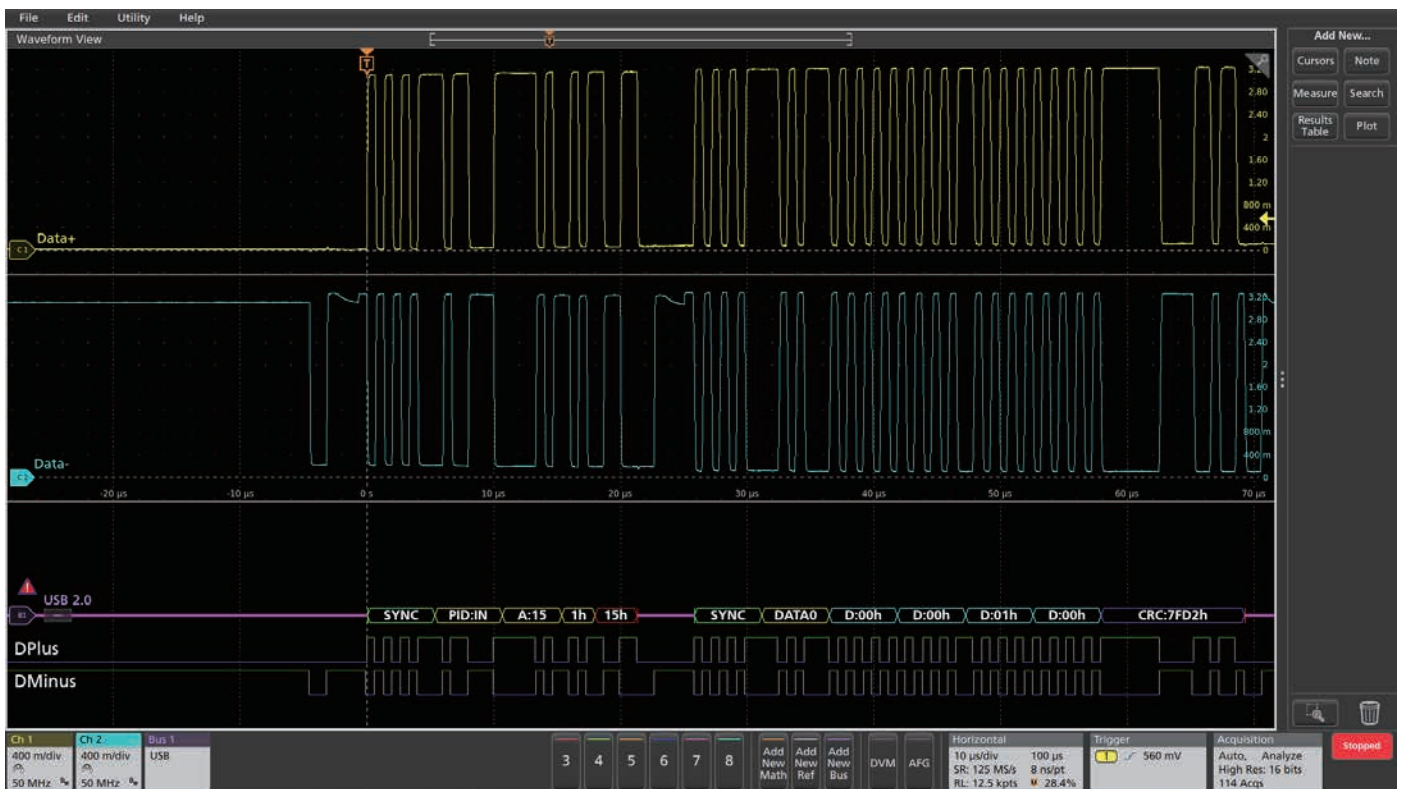
USB 2.0のデコード設定

Add New Busボタンをタップするか、前面パネルのBusボタンを押すと、USBバスが設定できます。信号速度、入力チャンネル、信号の種類、電圧スレッシュホールドなどの基本パラメータを設定します。

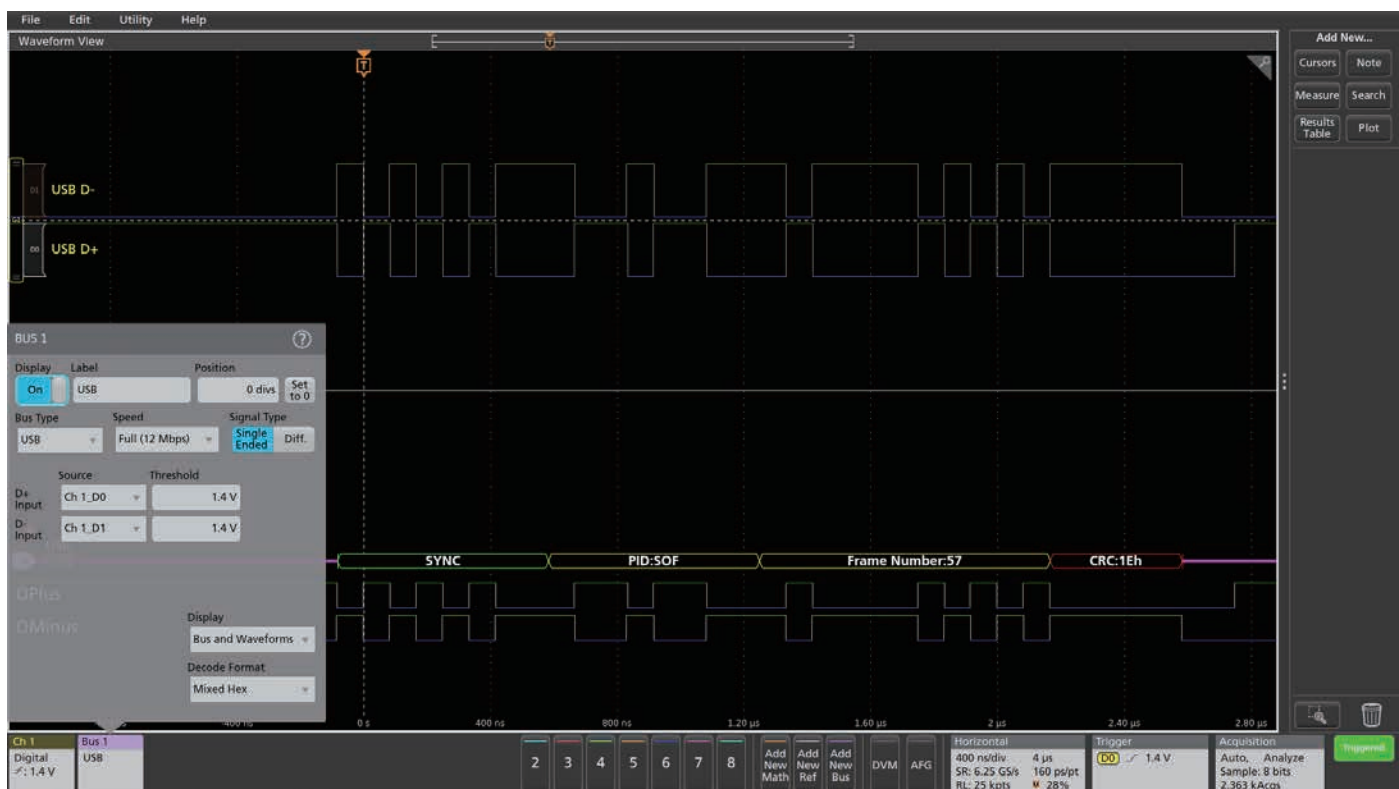
USB 2.0の信号は、差動ペアで伝送されます。それぞれの信号は、受動プローブ、アクティブ・アナログ・プローブ、デジタル・ロジック・プローブで取込むことができます。左に示す設定メニューでは、2つのシングルエンド・アナログ入力が設定され、PCとマウス間のロースピードUSB 2.0トラフィックを取込みます。

USB 2.0バスの読み方

オシロスコープは、ホストとロースピードUSBマウス間の通信を表示しています。USBホストはINトークンを送り、データを要求します。マウスは動いていないため、NAKを返します。

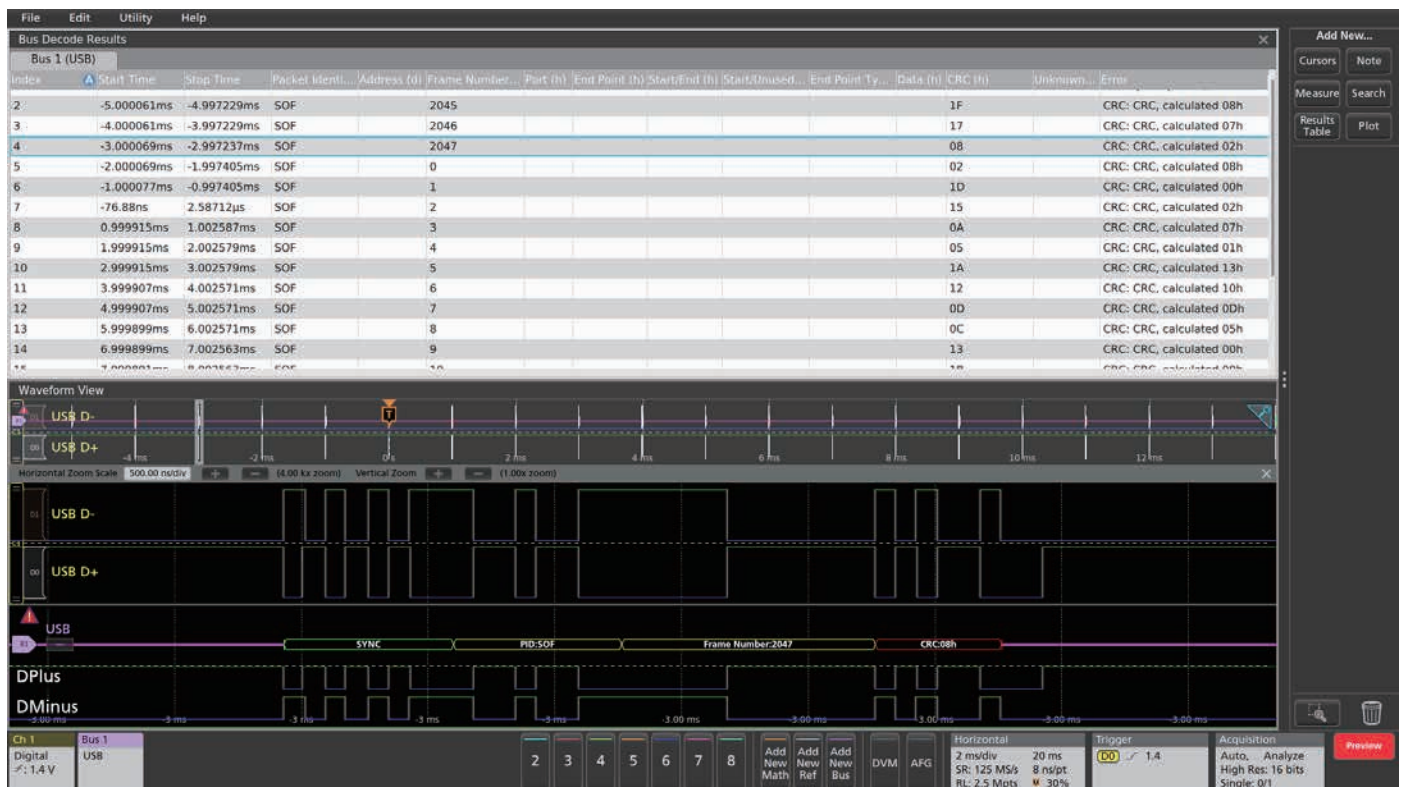


マウスが動くと、位置の変化を示すデータ・バイトをホストに返します。



この例は、PCとUSBドライブ間のフルスピードUSB 2.0のトラフィックを示しています。FlexChannel®入力にロジック・プローブを接続して信号を取込みます。シングルエンド・プローブでロースピードUSBバスを取込み、デコードすることもできますが、差動プローブを使用すると、信号忠実度が増し、ノイズ耐性が上がります。ハイスピードUSB信号では、差動プローブが必要になります。

USB 2.0バスの構成要素	マーク
SOF (Start Of Frame)	
Syncフィールド	
PID (パケット識別子)	
アドレス	
データは、16進またはバイナリで表示される	
CRCの値は紫のボックスで表示され、CRCエラーが発生すると赤のボックスで表示される	
EOF (End Of Frame)	



ファームウェアを担当するエンジニアにとっては、Result Tableの形式の方が便利かもしれません。バスの動きがタイムスタンプとともに表示されるため、ソフトウェアのリストとの比較が容易で、実行速度が簡単に計算できます。

Results Tableは、波形表示とリンクしています。表の行をタップすると、オシロスコープは対応するバス信号、デコードされたバス波形を自動的にズームして、ディスプレイ下部に表示します。



USB 2.0バスのトリガ

次の手順では、設計のデバッグ、検証時に特定のバス・イベントを検出し、取込み、表示するようにオシロスコープを設定します。

この例では、差動プローブを使ってPCとハイスピードUSBメモリ・デバイス間のUSB延長ケーブルを調べます。オシロスコープは、12 01の16進値で始まるデータ・パケットにトリガします。

オシロスコープは、次のUSBバス要素にトリガできます。

トリガ対象	概要
Sync	同期フィールド
Handshake Packet	タイプを指定：Any、ACK、NAK、STALL、NYET
Special Packet	タイプを指定：Any、ERR、SPLIT、PING、RESERVED
Error	タイプを指定：PID Check Bits、Token CRC5、Data CRC16 またはBit stuffing
Token (Address) Packet	タイプを指定：Any、SOF、OUT、IN、SETUP
Data Packet	タイプを指定：Any、DATA0、DATA1、DATA2、MDATA、16バイトまでのデータ・パターン
Reset	
Suspend	
Resume	
End of Packet (EOP)	



USB 2.0バスの検索

テクトロニクス製のオシロスコープにはWave Inspectorの機能を備えているものもあり、トリガ設定と同じイベントを自動的に検索し、マークを付けることができます。例えば、すべての取込みから、アドレス00 hexのSETUPトークン・パケットすべてを検索できます。この例では、特定のバス・イベントを2つ検出しています。マークの付いたそれぞれのイベントは、前面パネルのWave Inspector操作ボタンを押すことでイベント間を簡単に移動できます。

付録 A

テクトロニクスは豊富な機種を取り揃えており、最適な一台をお選びいただけます。

	MSO/DPO70000 シリーズ	DPO7000C シリーズ	5シリーズMSO	MSO/DPO5000 シリーズ	MDO4000C シリーズ	MDO3000 シリーズ	MSO/DPO2000 シリーズ
周波数帯域	33GHz、25GHz、 23GHz、20GHz、 16GHz、 12.5GHz、8GHz、 6GHz、4GHz	3.5GHz、2.5GHz、 1GHz、500MHz	2GHz、1GHz、 500MHz、 350MHz	2GHz、1GHz、 500MHz、 350MHz	1GHz、500MHz、 350MHz、 200MHz	1GHz、500MHz、 350MHz、 200MHz、 100MHz	200MHz、 100MHz、70MHz
アナログ・ チャンネル数	4	4	4、6、8	4	4	2または4	2または4
デジタル・ チャンネル数	16 (MSO)	--	8~64 (オプション)	16 (MSO)	16 (オプション)	16 (オプション)	16 (MSO)
スペクトラム・ アナライザ・ チャンネル数	--	--	--	--	1 (オプション)	1	--
レコード長 (全チャンネル、 ポイント)	最大62.5M (標準) 最大250M (オプション)	25M (標準) 最大125M (オプション)	62.5M (標準) 125M (オプション)	25M (標準) 最大125M (オプション)	20M	10M	1M
サンプル・レート (アナログ)	最高100GS/s	最高40GS/s	最高6.25GS/s	最高10GS/s	最高5GS/s	最高5GS/s	1GS/s
カラー・ ディスプレイ	12.1型XGA	12.1型XGA	15.6型HD	10.4型XGA	10.4型XGA	9型WVGA	7型WQVGA
シリアル・バス・ トリガ/解析	I ² C SPI RS-232/422/485/ UART CAN LIN FlexRay USB 2.0/3.1 Gen1 HSIC 10/100BASE-T Ethernet MIL-STD-1553 8B/10Bデコード D-PHY MIPI デコード PCI Express デコード	I ² C SPI RS-232/422/485/ UART CAN LIN FlexRay USB 2.0 HSIC 10/100BASE-T Ethernet MIL-STD-1553 8B/10Bデコード D-PHY MIPI デコード PCI Express デコード	I ² C SPI RS-232/422/485/ UART CAN LIN FlexRay USB 2.0 10/100BASE-T Ethernet I ² S/LJ/RJ/TDM	I ² C SPI RS-232/422/485/ UART CAN LIN FlexRay USB 2.0 HSIC 10/100BASE-T Ethernet MIL-STD-1553 8B/10Bデコード D-PHY MIPI デコード PCI Express デコード	I ² C SPI RS-232/422/485/ UART CAN CAN FD LIN FlexRay USB 2.0 I ² S/LJ/RJ/TDM MIL-STD-1553	I ² C SPI RS-232/422/485/ UART CAN CAN FD LIN FlexRay USB 2.0 I ² S/LJ/RJ/TDM MIL-STD-1553	I ² C SPI RS-232/422/485/ UART CAN LIN
同時に表示可能な シリアル・バス数	16	16	原則、無制限	16	3	2	2

お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465
オーストリア 00800 2255 4835
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他ISE諸国 +41 52 675 3777
ベルギー 00800 2255 4835
ブラジル +55 (11) 3759 7627
カナダ 1 800 833 9200
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
中央ヨーロッパ／ギリシャ +41 52 675 3777
デンマーク +45 80 88 1401
フィンランド +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835
ドイツ 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
インド 000 800 650 1835
インドネシア 007 803 601 5249
イタリア 00800 2255 4835
日本 81 (3) 6714 3010
ルクセンブルク +41 52 675 3777
マレーシア 1 800 22 55835
メキシコ、中央／南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835
ニュージーランド 0800 800 238
ノルウェー 800 16098
中国 400 820 5835
フィリピン 1 800 1601 0077
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
韓国 +82 2 6917 5000
ロシア +7 (495) 6647564
シンガポール 800 6011 473
南アフリカ +41 52 675 3777
スペイン 00800 2255 4835
スウェーデン 00800 2255 4835
スイス 00800 2255 4835
台湾 886 (2) 2656 6688
タイ 1 800 011 931
イギリス、アイルランド 00800 2255 4835
アメリカ 1 800 833 9200
ベトナム 12060128
2016年2月現在



jp.tek.com

テクトロニクス／ケースレイインストルメンツ
お客様コールセンター

TEL: 0120-441-046 ヨク! 良い オシロ 電話受付時間 / 9:00~12:00・13:00~18:00
(土・日・祝・弊社休業日を除く)

〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © 2017, Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

2017年6月 55Z-61092-0