

規格を超えた利用: ツイストペアケーブルの 距離を延長する

PANDUIT™

www.panduit.co.jp

PAUL WACHTEL

リサーチマネージャー、パンドウイト研究開発部門

目次

要旨	3
ギガビット通信の規格と仕様の変遷	4
重要な伝送要件および新たなカテゴリから 得られるメリット	4
S/N 比のメリット: Cat5 と Cat6 および Cat6A の比較	6
信頼性の高い延長リーチの実験的検証	8
200 m のチャンネルの問題	13
まとめ	14

著者について

Paul Wachtel、リサーチマネージャー、パンドウイト研究開発部門

Paul Wachtel はパンドウイトの研究開発部門に 16 年間在籍。1997 年に Purdue 大学で BSEE の学位を取得

要旨

はじめに

ツイストペアケーブルは、長年にわたってイーサネットネットワークを構築する上で信頼できる手頃な価格のメディアでした。この信頼は、ケーブルインフラとそれらがサポートするアプリケーションの標準化が一致したことに部分的に起因しています (Cat6A ケーブルが 10GBASE-T イーサネットに対応しているなど)。ケーブルの標準化とアプリケーションが整合性を保っていることの 1 つの要素として、ケーブルチャネルの最大長が 100 m に厳しく制限されていることがあります。ところが、22 AWG のツイストペアケーブルの新しい設計が市場に登場し、100 m をはるかに超える距離で 1000BASE-T を実現できるとの主張がなされています。これにより、こうした主張の信頼性に関する懸念が生じています。

100 m を超える性能の主張をケーブルメーカーがどのように検証したかについて、パンドウイットは知ることはできません。しかし、おそらく多くの場合、一部の機器をサンプリングした試験によるものと考えられます。これは好ましい評価方法に思えるかもしれませんが、試験対象のデバイスにどれほどのマージンがあるかが不明なため、このことに起因する大きなばらつきの影響を受けます。試験対象ではなかった別のデバイスを使ったり、ファームウェアをアップグレードしたりするといった単純な行為が原因で、そのデバイスが長距離で突然機能しなくなることもあります。

あらゆるアプリケーションで試験を行うことに加えて、パンドウイットは、22 AWG の Cat6 あるいは Cat6A ケーブルの距離を延長したときのメリットを理解するには、できる限り規格ベースの手法に従うべきであると考えています。規格ではケーブルの最大長は 100 m と規定されていますが、1000BASE-T イーサネットリンクの堅牢性を保証するための他のケーブル伝送特性も規定されています。この文書では、ケーブルが 100 m を超えてどこまで到達でき、確実に機能できるかに関する指針を示しています。

結果

パンドウイットは当社のラボ環境で試験を実施し、図 1 に示すような、さまざまな長さの 22 AWG リンクに、合計 10 m の 24 AWG パッチコードを接続したものを調査しました。



図 1: 合計 10 m の 24 AWG パッチコードを接続した試験対象の 22 AWG リンク

結果は以下のとおりです。

- 1000BASE-T システムは Cat5 チャンネルに最低限準拠するように設計されていた
- システムの長さを制限する重要なパラメーターは、挿入損失 (IL) と伝搬遅延時間差である
- Cat6 以上の規格では、挿入損失などの重要なパラメーターで Cat5 の規格よりもさらにマージンを持たせており、NEXT と ACRF の性能が高いためノイズが低くなっている
- 22 AWG の Cat6 以上のケーブルでは、挿入損失のマージンが規格よりもずっと大きい
- 140 m の 22 AWG パーマネントリンクと 10 m の 24 AWG パッチコード (150 m のチャンネル) は、1000BASE-T システムの要件を最低限満たし、さまざまなネットワーク機器とエンドポイントの間の通信に確実に対応できる

まとめ

距離を延長する場合、パンドウイットでは最大 150 m のチャンネル (140 m の 22 AWG Cat6 リンクと 10 m の 24 AWG パッチコード) を推奨します。パンドウイットではこの推奨事項を理論と実験の両面から検証しました。

ギガビット通信の規格と仕様の変遷

IEEE-802.3ab 規格は 1999 年に発表されました。この規格では、シールドなしツイストペア (UTP) Cat5 ケーブルを使用したギガビットイーサネット通信 (1000BASE-T) が規定されています。Cat5 (後で Cat5e に置き換えられました) は、最大長が 100m の 10Mbps と 100Mbps の両方のイーサネット通信に対応できる、最初のツイストペアインフラストラクチャでした。IEEE-802.3ab 規格の発表により、Cat5 ケーブルの設置基盤はギガビットイーサネット通信に対応できるようになりました。

堅牢性のある 1000BASE-T 通信を保証するために、TIA/EIA-568-A ではケーブルチャネルの伝送パラメーターが指定されています。1 ~ 100 MHz の周波数の範囲で指定されている伝送パラメーターとしては、挿入損失、伝搬遅延、伝搬時間差、特性インピーダンス、NEXT (近端漏話)、ACRF (減衰対遠端漏話比)、PSACRF (電力和減衰対遠端漏話比)、反射減衰量などがあります。IEEE-802.3ab のセクション 40.7.2 によると、指定された伝送パラメーターに準拠することで、100 m までの確実な通信が保証されます。

ケーブルチャネルの伝送特性の指定に加えて、IEEE-802.3ab 規格では、リンクを使用した通信を確実に送受信するために必要なハードウェアの電気的特性も指定されています。IEEE-802.3ab 規格と ANSI/TIA/EIA-568-A 規格による詳細な仕様の規定により、準拠しているすべてのハードウェアおよびケーブルチャネルが確実に相互運用でき、1000BASE-T 通信のための堅牢なソリューションが市場に提供されています。その結果、1000BASE-T ネットワークは 20 年以上グローバル展開に成功してきました。

今日では、ANSI/TIA-568.2 規格シリーズおよび ISO/IEC 11801 規格シリーズはどちらも、100 m までのチャネル長さのときの Cat5e (Class D) から Cat6A (Class EA) までのケーブルの性能要件を規定しています。

重要な伝送要件および新たなカテゴリから得られるメリット

規格の比較: Cat5 と Cat6 および Cat6A の比較

Cat6 や Cat6A などの新しいケーブルインフラストラクチャでは、最大 10Gbps の速度のイーサネット通信に対応します。これらのケーブルの伝送特性は、元の Cat5 の要件よりもはるかに改善されています。図 2、図 3、図 4、および図 5 は、1000BASE-T の周波数範囲 1 ~ 100 Mhz におけるさまざまなケーブルカテゴリで、挿入損失、NEXT、ACRF、および反射減衰量の要件を比較したものです。

図 2 に示すように、100 m を超える Cat6 または Cat6A ケーブルの挿入損失は、Cat5 よりも著しく少なくなっています。Cat6 または Cat6A ケーブルでは損失が少ないため、1000BASE-T のリンクでは高い信号強度が実現され、受信機で観測される S/N 比 (SNR) のマージンが大きくなります。

図 3、図 4、および図 5 は、Cat6 および Cat6A ケーブルの改善された NEXT、PSACRF (電力和減衰対遠端漏話比)、および反射減衰量の特性が、Cat5 と比較して強調されています。ペアの間でのクロストークや反射エネルギーはすべて受信機の合計ノイズに寄与します。ケーブル接続に起因する受信機によって観測されるノイズは、Cat6 または Cat6A ケーブルによってもたらされる大きなマージンによって、1000BASE-T の要件に比較して劇的に低下しました。その結果、S/N 比 (SNR) は Cat6/6A ケーブルの優れた伝送特性によって、さらにいっそう改善されます。

要約すると、次のようになります。

- Cat6 および Cat6A 規格は Cat5 規格に比べて挿入損失が大きく改善されている
- Cat6 および Cat6A 規格は Cat5 規格に比べて NEXT、ACRF、反射減衰量などの関連するすべてのパラメーターでノイズが軽減されている

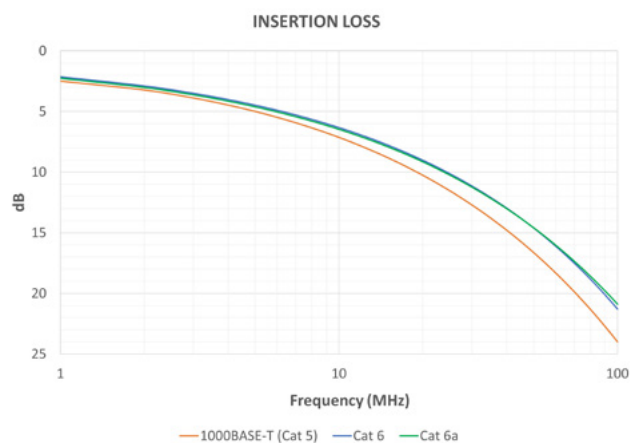


図 2: 1000BASE-T 仕様と Cat6 および Cat6A 規格の間の挿入損失の比較

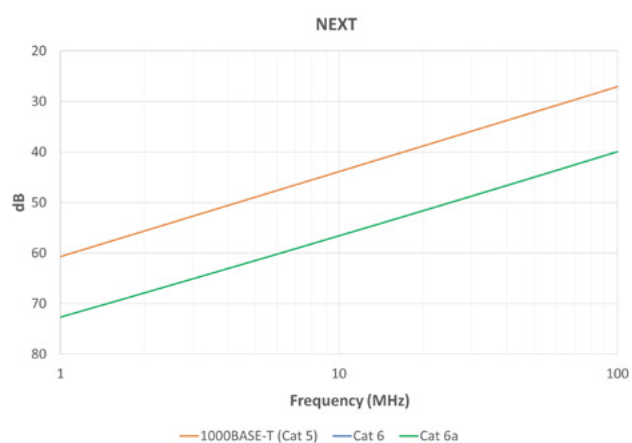


図 3: 1000BASE-T 仕様と Cat6 および Cat6A 規格の間の NEXT の比較

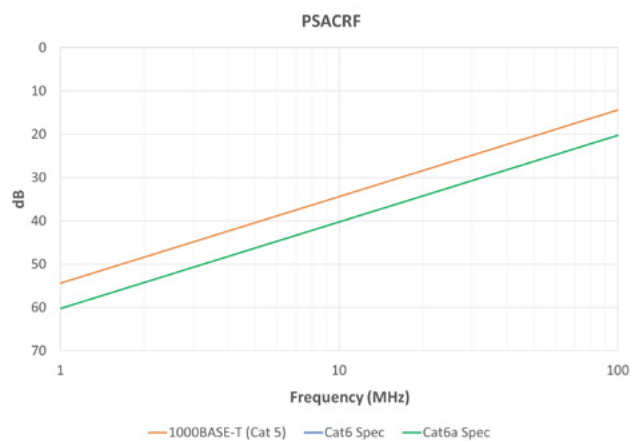


図 4: 1000BASE-T 仕様と Cat6 および Cat6A 規格の間の PSACRF の比較

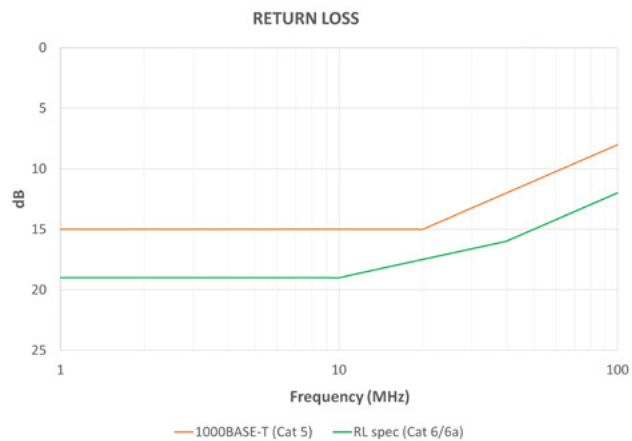


図 5: 1000BASE-T 仕様と Cat6 および Cat6A 規格の間の反射減衰量の比較

S/N 比のメリット: Cat5 と Cat6 および Cat6A の比較

SNR は、受信機が信号とノイズを識別できるかどうかを判別する測定基準として役立つため、データ伝送の重要なパラメーターです。Cat6 および Cat6A と Cat5 の SNR のメリットを判別するために使用される方法は、以下のとおりです。

- 1000BASE-T の送信機のパワースペクトル密度 (PSD) を測定します (Cat5、Cat6、Cat6A のどのケーブルを使用する場合でも同じになります)
- Cat5 ケーブルチャンネルで発生する全ノイズの PSD を測定します
- Cat6 または Cat6A ケーブルチャンネルで発生する全ノイズの PSD を測定します
- Cat5 ケーブルチャンネルと Cat6 ケーブルチャンネルの両方で通信する 1000BASE-T の送信機から発生する受信信号の PSD を測定します

図 6 は、規格に準拠した 100 m の Cat5 チャンネルから得られた受信信号および全ノイズと、規格に準拠した 100 m の Cat6 チャンネルから得られた受信信号および全ノイズの PSD の比較を示しています。SNR の改善量である 5.9 dB は PSD 値から計算できます。

この SNR の全体的な改善量 5.9 dB は、以下のことによる直接的な結果です。

- Cat6 および Cat6A ケーブルの挿入損失の低下による Rx (受信) 信号出力の増加
- NEXT、ACRF、および反射減衰量の改善による全ノイズの減少

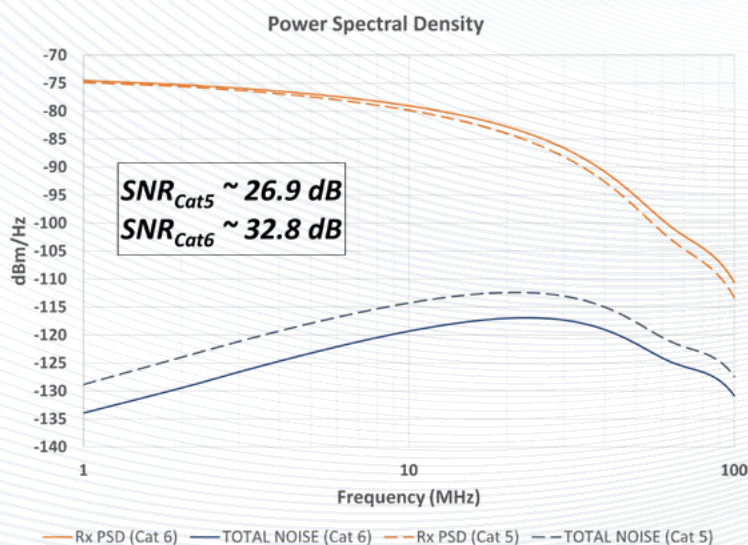


図 6: Cat5 ケーブルチャンネルのノイズの PSD、Cat6 ケーブルチャンネルのノイズの PSD、および Cat5、Cat6、または Cat6A のケーブルシステムで伝送された 1000BASE-T 受信信号から得た PSD

S/N 比のみを使用することの注意点

図 6 に示す Cat6 チャンネルによって提供される SNR のマージンを利用して、1000BASE-T リンクのチャンネルの長さを延長することができます。チャンネルが長いほど挿入損失が増加しますが、全ノイズが低いという Cat6 チャンネルの特性のため、SNR は Cat5 チャンネルと同じかそれより良くなる可能性があります。図 7 は、Cat6 チャンネルの理論的な最大挿入損失が、同等の Cat5 の SNR である 26.5 dB になることを示しています。つまり、22 AWG の水平ケーブルは、従来の 23 AWG または 24 AWG のケーブルに比べて挿入損失と DC 抵抗が低いため、延長距離を十分に最大化するための最も効率的な良い解決方法となります。

受信機に影響を及ぼす挿入損失関連の要素は SNR だけではありません。上記の図 2 に示すように、ケーブルチャンネルの挿入損失は、周波数によって直接変化します。周波数が増加するにつれて、挿入損失が増加します。1000BASE-T のすべての受信機は、ケーブル損失が周波数に依存する性質を等化するためのデジタル信号処理 (DSP) 手法を用いることによってこの変動を補正する必要があります。準拠した受信機は、1000BASE-T の挿入損失制限までの損失を等化できます。Cat6 の挿入損失が 1000BASE-T の制限を超えるときの SNR 性能は許容できても、すべてのハードウェアで、これらの追加の損失を適切に等化できるというわけではありません。

この点は複雑ですが、この文書で後述する内容に留意する必要があります。バンドウィットでは、信号強度要件と SNR 要件の両方を満たすことを推奨しています。

Cat6 および Cat6A ケーブルで伝送するシステムは、1000BASE-T の SNR 要件を長い距離で満たすことができます。ただし、挿入損失の増加により発生する周波数依存のばらつきが過剰になることもあります。したがって、図 7 の理論上の挿入損失制限を工学的ソリューションの中で使用して、システムの距離を延長することはできますが、等化能力に基づき、機器の種類によっては問題が発生します。

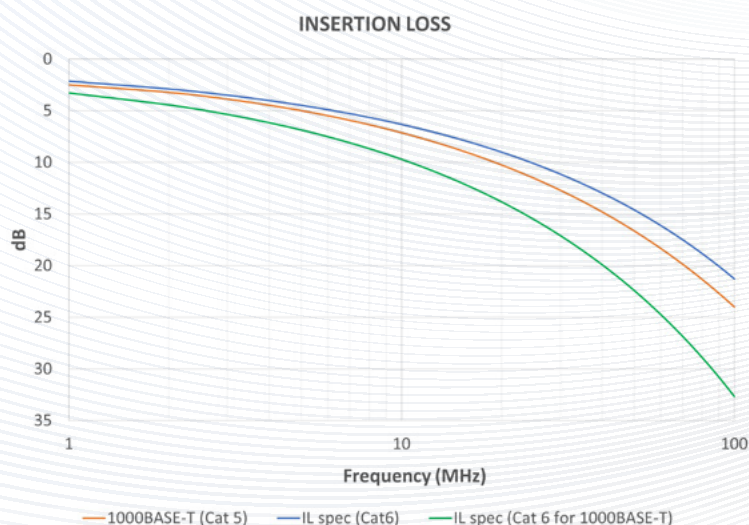


図 7: 1000BASE-T リンクでの Cat6 挿入損失の理論上の最大値

伝搬遅延

信頼性の高い 1000BASE-T 通信に影響を及ぼすケーブル配線の側面は、挿入損失に関連する要因だけというわけではありません。伝搬遅延と遅延時間差は、ケーブルチャンネルによって決まる 2 つの重要な伝送特性です。

- 伝搬遅延とは、信号が送信された後に受信されるまでに必要な時間のことです
- 遅延時間差とは、各ツイストペアの間の伝搬遅延の差のことです

絶対伝搬遅延は、最新の BASE-T ネットワークでは過去のネットワークほど重要ではありません。10BASE2 などの従来のイーサネットネットワークでは、伝搬遅延要件によって、効果的な衝突検出のために往復遅延が妥当であることが保証されていました。これらの従来のネットワークでは、複数のデバイスが同じケーブルに接続され、共有されたケーブル上ですべてのデバイスが伝送することが許可されていたため、衝突検出が必要でした。今日の有線の BASE-T ネットワークでは、スイッチとエンドポイントの間にポイントツーポイント接続が導入されており、衝突がきわめてまれなため、衝突検出は必要ありません。したがって、伝搬遅延は今日の 1000BASE-T ネットワークではそれほど重要ではありません。

しかし、遅延時間差は依然として条件を満たすべき重要なパラメーターです。チャンネル経由で送信されるデータがケーブルチャンネルの 4 つのツイストペアに分割されたとき、4 つのペア上のデータが遠端の受信機で適切に組み立て直せるように、2 つのペアの間の遅延の差 (時間差) に制約があることが重要です。遅延時間差が長すぎると、受信機はデータを適切に組み立て直せなくなります。遅延時間差は、絶縁体とケーブルのツイスト率によって制御されます。

表 1 は、1000BASE-T 通信と Cat6/6A ケーブルチャンネルの関連する仕様を示しています。

表 1: Cat5、Cat6、および Cat6A チャンネルの伝搬遅延と遅延時間差の要件

パラメーター	1000BASE-T (Cat5)	Cat6	Cat6A
伝搬遅延 (チャンネル)	570 ns	555 ns	555 ns
遅延時間差 (チャンネル)	50 ns	50 ns	50 ns

この分析では、Cat6 または Cat6A ケーブル (特に 22 AWG ケーブル) の距離の延長が、カテゴリ自体の改良と、ゲージの大きい導体を使用する利点を活かして理論上可能であることを示しています。しかし、実際のデバイスを使用した実験による検証も必要です。

信頼性の高い延長リーチの実験的検証

試験方法

100 m を超える 1000BASE-T の運用を規定する規格は現時点では存在しないため、バンドウィットでは 1000BASE-T イーサネットに対応できる確実なチャンネル長の延長について理解し定量化する目的で、広範囲にわたる適用試験およびチャンネル試験を実施しました。

距離を延長した通信に関するすべての要因の影響を理解するために、バンドウィットでは一連の適用試験を行いました。各種ネットワーク機器の間に 1000BASE-T リンクを試験するためのテストチャンネルを構築しました。チャンネルは図 8 に示すように構築し、10 m の 24 AWG パッチコード、Cat6 コネクタ 2 個、190 m の 22 AWG Cat6 水平ケーブルを使用して、200 m の伝送チャンネルにしました。試験に使用したネットワーク機器では、実際の構築に見られる多種多様なテクノロジーと実装を捕捉するために、さまざまな BASE-T PHY チップセットを使用しました。試験機器には、従来の 10/100/1000BASE-T チップセットのほか、最近の 10GBASE-T および NGBASE-T チップセットも搭載されていました。

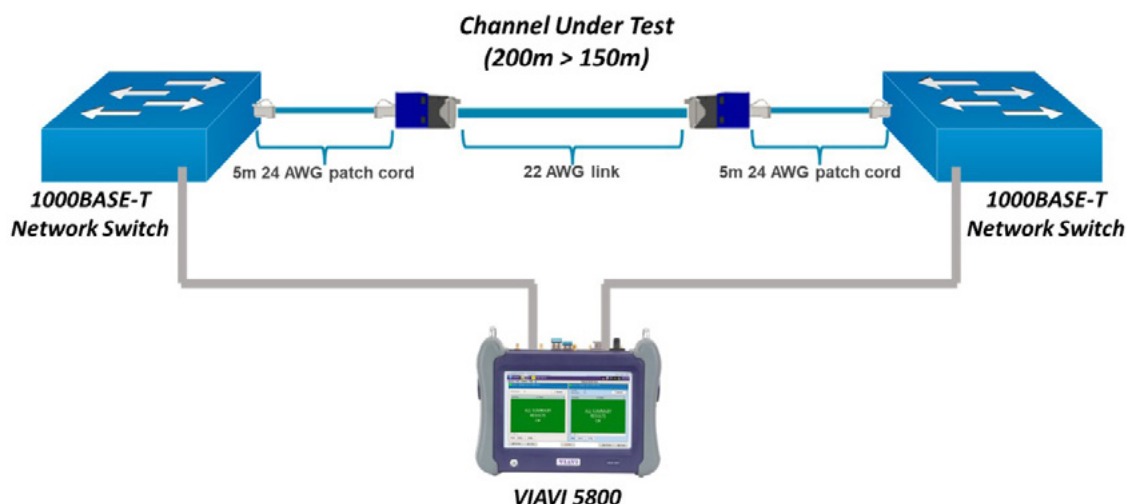


図 8: テストチャネル構成

リンク性能は、拡張 RFC 2544 試験を実行する Viavi 5800 ネットワークテスターで捕捉しました。この業界標準のベンチマーク試験では、スループット、レイテンシー、フレーム損失などの重要な性能指標を信頼できる反復可能な方法で捕捉します。

試験結果

試験は最初に 200 m で開始した後、水平ケーブルの長さを減少することで段階的に短くして行いました。ある一定の長さになると、一部の機器がリンクし始めましたが、パンドウィットでは、すべての機器がリンクでき、堅牢性のある「エラーのない」通信ができるケースを見つけようとしてきました。拡張 RFC 2544 試験は試験対象のネットワーク機器に対しても行われ、ある特定の長さでスループットの低下やフレーム損失がないことが確認されました。

- 200 m: すべての種類のネットワーク機器で、1000BASE-T リンクを確立できませんでした
- 150 m: すべての機器が 1000BASE-T リンクのネゴシエーションを正しく行って確実に通信でき、スループットの低下がなくフレーム損失もゼロでした

したがって、適用試験により 150 m のチャネル (140 m の 22 AWG Cat6 と 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード) では 1000BASE-T を確実に実行できることが実験的に示されました。

150 m チャネルの伝送の測定値

150 m チャネル (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブルと 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード) の重要な伝送特性の測定値を図 9、図 10、図 11、および図 12 に示します。これらのグラフでは、実際の 1000BASE-T 仕様と、Cat6 および Cat6A ケーブルの改善された性能から導出された理論上の仕様の両者が比較されています。

以下のことがわかります。

- NEXT、PSACRF、反射減衰量 (図 10、図 11、および図 12) は 1000BASE-T 仕様をすべてはるかに超えている
- 挿入損失 (図 9) は、100 MHz では 1000BASE-T の挿入損失にわずか 1.8 dB だけ達していないが、Cat6 の制限をはるかに超えている

したがって、150 m のチャンネル (140 m の 22 AWG Cat6 パーマネントリンクと 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード) では、準拠した 1000BASE-T 受信機によって等化できる、堅牢性のある SNR と挿入損失のプロファイルを提供できることを、パンドウイットは確信しています。

1000BASE-T 規格が 150 m のときの限界性能であるため、150 m を超えるチャンネル長にはリスクがあります。これは、すべての受信機が過剰な損失を等化できるわけではないためです。

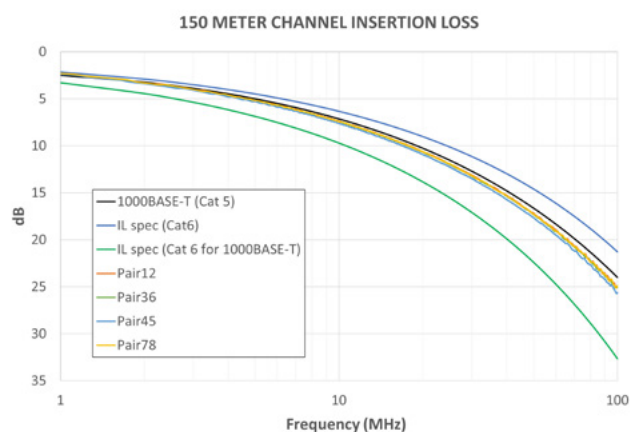


図 9: 150 m チャンネルの挿入損失 (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

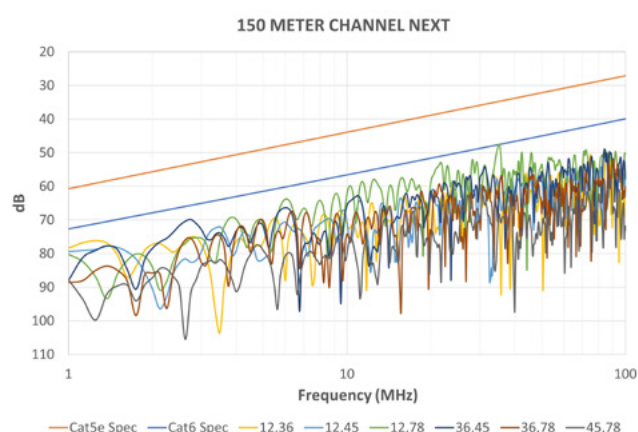


図 10: 150 m チャンネルの NEXT (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

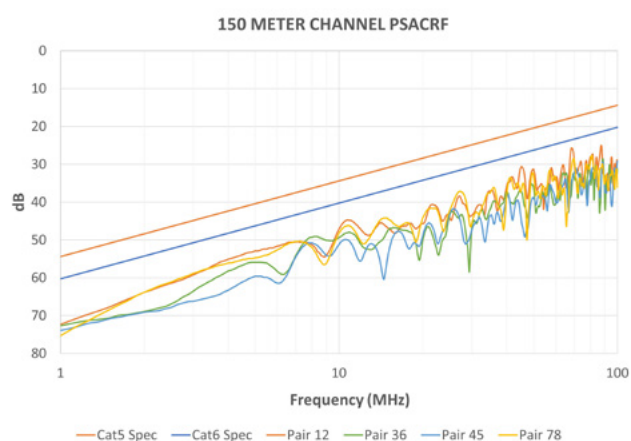


図 11: 150 m チャンネルの PSACRF (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

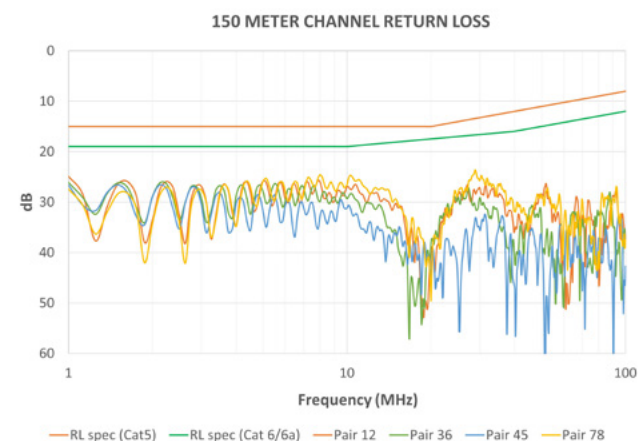


図 12: 150 m チャンネルの反射減衰量 (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

150 m のチャネルの伝搬遅延および遅延時間差

図 13 は、規格に規定された 50 ナノ秒 (ns) の遅延時間差を十分に下回っている 6 つのペアの組み合わせのうちの 5 つを示したものです。撚り数の多いツイスト (ピン 45 のペア) と撚り数の少ないツイスト (ピン 78 のペア) の間の遅延時間差は、制限をわずかに (3 ns) 超えています。

パンドウイトは、ケーブルの全体的な高い性能と、広範囲にわたる適用試験に基づき、150 m のチャネルが 1000BASE-T に対応することを確認しています。

ただし、チャネルが長くなるほど遅延時間差性能が悪化するため、150 m を超えたときの性能について注意すべきもう 1 つの要因は限界性能です。

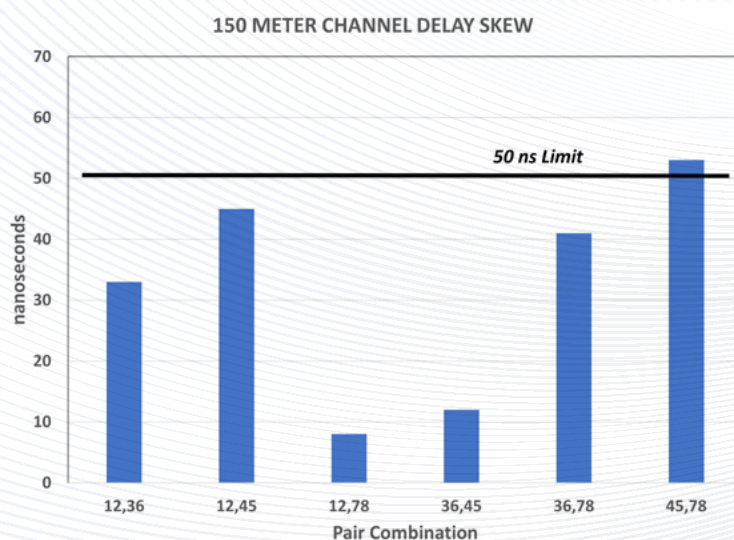


図 13: 150 m チャネルの遅延時間差 (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

距離の延長と Power over Ethernet

IEEE 802.3af、802.3at、および 802.3bt の規格に規定されている PoE (Power over Ethernet) のアプリケーションに対応することは、BASE-T インフラストラクチャの最近のあらゆる構築における重要な要件です。チャンネル長が 100 m を超えた場合、PoE 要件が満たされていることを確認する必要があります。重要なパラメーターは以下のとおりです。

- チャンネルの DC 抵抗 – チャンネルのツイストペアの送信機と受信機間の抵抗
- チャンネルの DC 抵抗のアンバランス – ツイストペアの個々の導線の間の抵抗の差 (つまり、ペア 12 でのワイヤ 1 とワイヤ 2 の抵抗の差)
- チャンネル DC のペア間の抵抗のアンバランス – 各ツイストペア間の DC 抵抗の差

パンドウイットの試験における 150 m のテストチャンネル (図 8 に示す) の測定値を、図 14、図 15、および図 16 に示します。

試験結果からわかるように、150 m のチャンネルは PoE 伝送に問題なく対応できます。

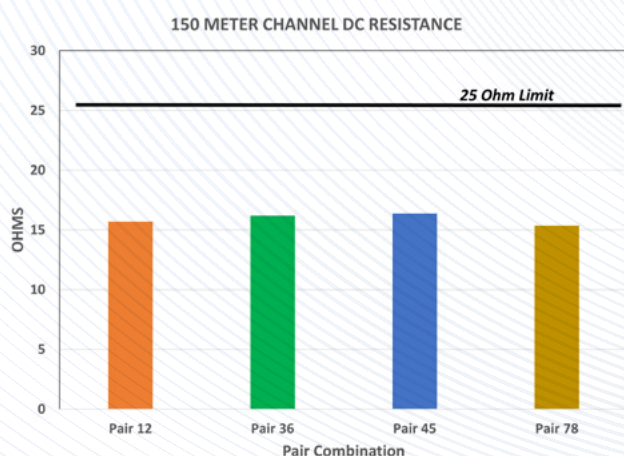


図 14: 150 m チャンネルの DC 抵抗 (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

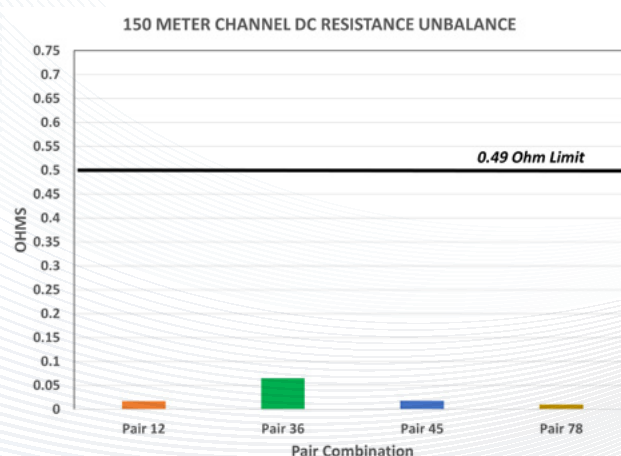


図 15: 150 m チャンネルの抵抗アンバランス (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

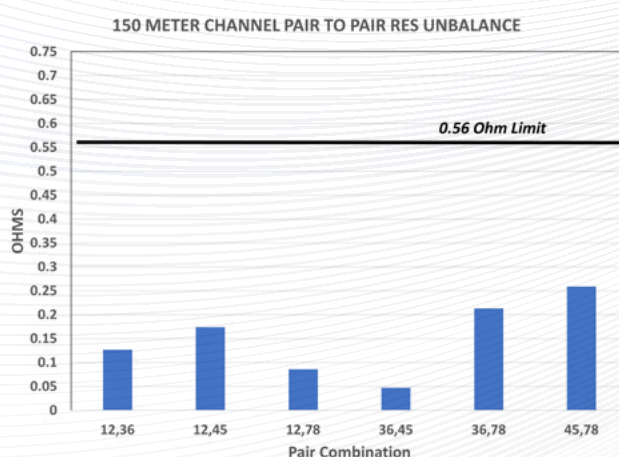


図 16: 150 m チャンネルのペア間の抵抗のアンバランス (140 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)



200 m のチャネルの問題

業界内では、1000BASE-T 通信が 22 AWG ケーブルを使って 200 m まで延長できるという主張がなされています。この主張には問題があり、設置を試みる技術者に問題が生じる可能性があります。チャネルの挿入損失と遅延時間差という 2 つの重要なパラメーターを、図 17 と図 18 に示します。

結果は以下のとおりです。

- 200 m のチャネルは 1000BASE-T の挿入損失の要件をまったく満たしていません
- 200 m のチャネルは 1000BASE-T の遅延時間差の要件をまったく満たしていません

前述したように、拡張 RFC 2544 を実行する Viavi 5800 ネットワークテスターを使用したとき、パンドウイットのテスターは、すべての機器でチャネルを 200 m でリンクさせることができませんでした。

したがって、設置された機器の種類によってはリンクを機能させることが可能かもしれませんが、150 m を超えるチャネルには信頼性の高いリンクの確立という観点で非常に大きなリスクがあります。

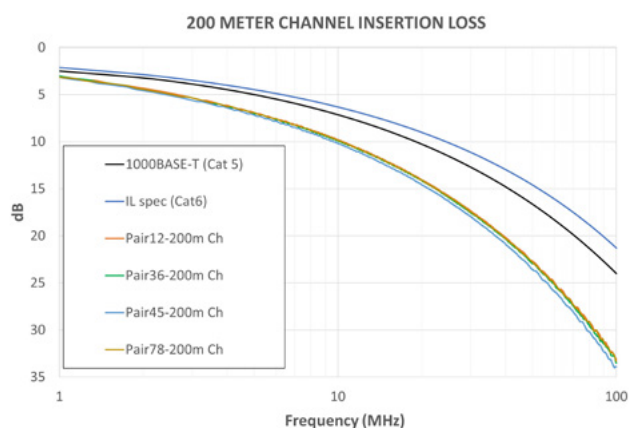


図 17: 200 m チャネルの挿入損失 (190 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

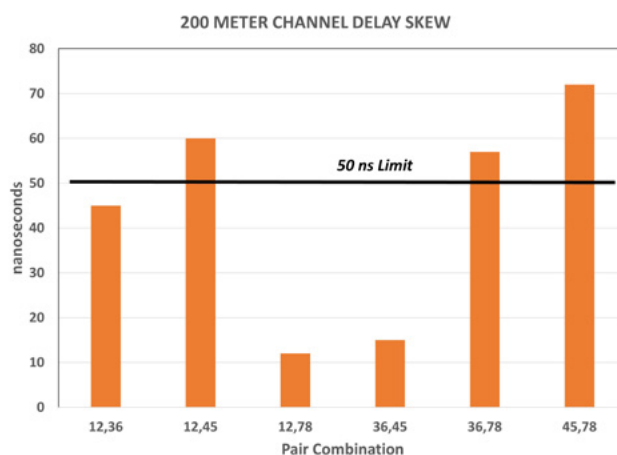


図 18: 200 m チャネルの遅延時間差 (190 m の 22 AWG Cat6 ケーブル、および 10 m の 24 AWG Cat6 パッチコード)

まとめ

バンドウイットでは、150 m のチャンネルが 1000BASE-T の通信を確実に送信するための最大長であるということを理論的かつ実験的に検証しました。

- 150 m のチャンネルは 140 m の 22 AWG Cat6 ケーブルと、10 m の 24 AWG Cat6 パッチコードで作成しました
- 150 m のチャンネルは、あらゆるネットワーク機器を使用した拡張 RFC 2544 試験において、スループットの低下がなくフレーム損失がゼロとなる最大の長さでした
- 150 m のチャンネルは、伝送特性と 1000BASE-T のチャンネル要件を比較して評価することによっても検証されました。150 m のチャンネルは挿入損失と遅延時間差についてはほぼ限界でしたが、Cat6 と Cat6A ケーブルのノイズ改善により 150 m で機能可能です
- 150 m を超えるチャンネルでは、すべての試験で問題が現れ、ケースバイケースの工学的評価を行わなければ 1000BASE-T の信号を確実に通過させることはできません

したがって、バンドウイットでは長さが 150 m までのチャンネルにおいて、1000BASE-T の性能に対する Panduit Certification Plus Warranty を提供しています。ただし、そのチャンネルがこの文書で説明するパラメーターを満たし (140 m の 22 AWG Cat6 または Cat6A ケーブルと、10 m の 24 AWG パッチコード)、保証に説明されているようにチャンネルが敷設されている場合に限られます。

お客様とのつながりこそ、 当社の最大の財産です。

当社には、お客様のインフラストラクチャ投資の効果を最大化するための知識と経験があります。

www.panduit.co.jp

ぜひご相談ください

www.panduit.com/contact-us