

Amkor 5G RF テストサービス

Vineet Pancholi, Sr Director, Test Technology, WW Test Services, [Amkor Technology, Inc.](#)

はじめに

高周波（RF）規格での 5G の採用が急速に加速しています[1]。過去 4 四半期から 6 四半期にかけて、市場に導入された製品への注目度が高まってきました。より一般的な RF エコシステムのアプリケーションには、携帯電話、Wi-Fi、車載製品、モノのインターネット（IoT）、位置情報サービスなどがあります。Wi-Fi や携帯電話のサービスはデータ量が多いですが、IoT の場合は限られたデータ量で済む場合もあります。

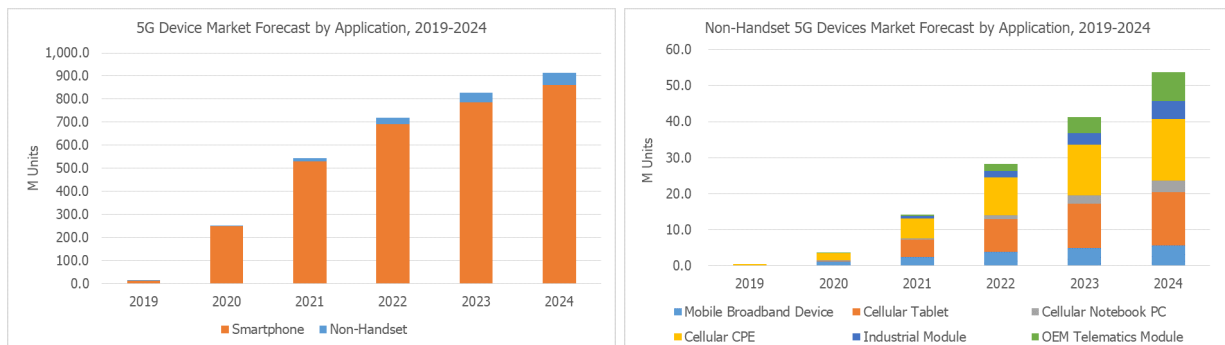


図 1 : 5G 製品の成長予測 出典: IoT ビジネスニュース

4G のモバイルネットワークのユニット数を基準にすると、図 1 のユニット数と 5G 規格に関する市場規模（TAM）の信頼度は高いように思われます。5G 仕様に合わせて製品を開発している世界中の地域では、このような数量予測を示す類似の計画が数多く存在します。5G RF ユニット数の増加は、テストユニット数の増加につながると予想されます。ユーザー機器の導入に先立って、インフラストラクチャーの開発と展開が行われると予想されます。図 2 に示すように、代表的な携帯電話機器には、携帯電話のタワー付きの基地局が含まれており、それぞれがサービスエリア内の複数のユーザーの携帯電話に対応しています。

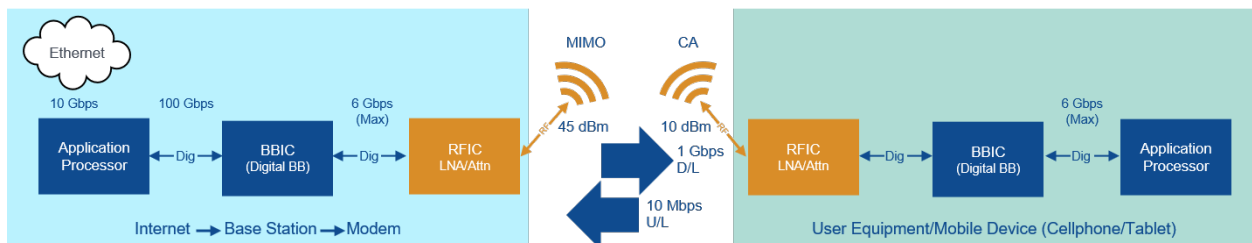


図 2 : 双方向 RF 通信ブロック図の主な構成要素は、アプリケーションプロセッサ（AP）、ベースバンド集積回路（IC）、無線周波数集積回路（RFIC）です

基地局は、複数のユーザー機器に対応するためのサービスエリアを担うため、ユーザー機器に関連して必要とされる RF 電力は高くなります。基地局はプラグインパワーで駆動していますが、ユーザー機器はモバイルバッテリー駆動ですので電力効率を重視した設計になっています。携帯電話にダウンロードされたデータの大きさは、アップロードされたデータよりも桁違いに大きいので、受信チャンネルの数は、通常、送信チャンネルの数よりも大きくなります。プロトコルレイヤーでは、実効帯域幅を拡大するために、マルチ入力マルチ出力 (MIMO) 、キャリアアグリゲーション (CA) [1]のようなコンセプトが採用されています。受信チャンネルは通信信頼性を向上させるためにダイバーシティ[1]を採用しています。これらのコンセプトは本稿の中心テーマではありませんが、製品アーキテクチャと設計はテストの要件と方法論に影響を与えます。Wi-Fi 技術をベースにしたアプリケーションは、一般的に家庭内/オフィス内で使用されています。それらの最大 RF パワーは限られていますが、まだダイナミックレンジではなく、一般的に携帯電話に関しては帯域幅が高くなっています。

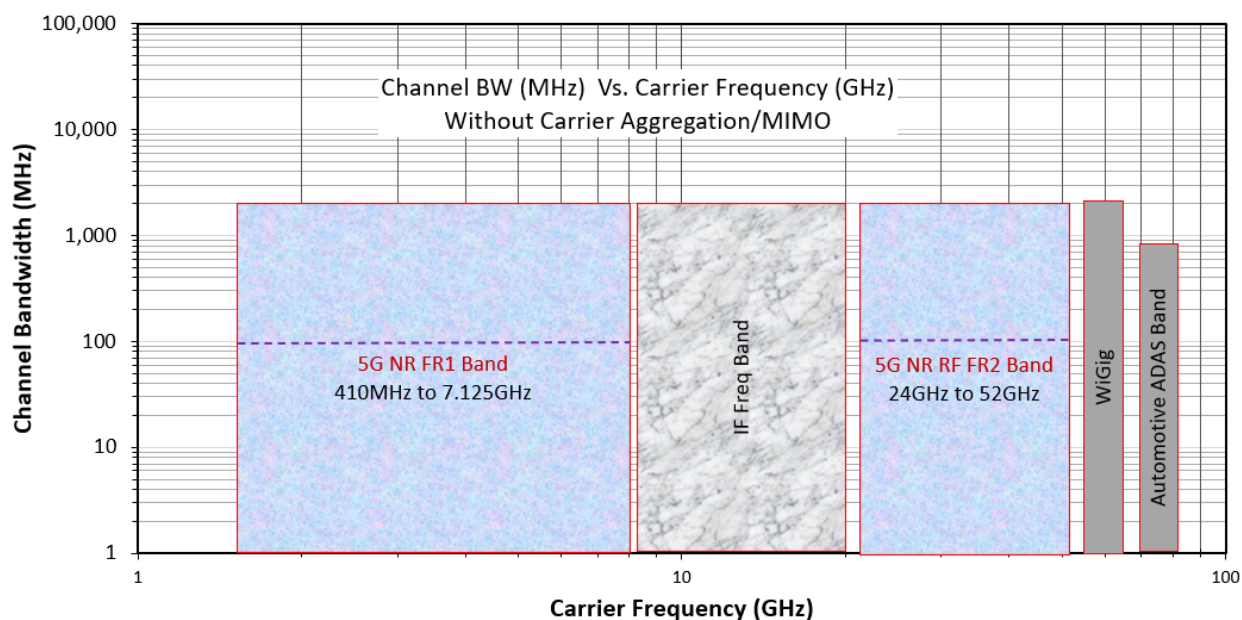


図 3 : 5G キャリア周波数は、3GPP 仕様書[1]で定義されています

最近導入された 5G 3GPP 規格[1]では、2つの異なるキャリア周波数スペクトラムでキャリア周波数を識別しています。図 3 に示すように、FR1 キャリア周波数は 410 MHz から 7.125 GHz の範囲にあり、FR2 キャリア周波数は 24 GHz から 52 GHz の範囲にあります。許容帯域幅は 100MHz を超えて最大 2GHz までとなっています。サブキャリアの間隔が圧縮されるため、位相ノイズと利得フラットネスのためのより厳しい制約が必要になります。

5G 新無線 (NR) 変調方式

5G NR 信号変調方式には、巡回プレフィックス直交周波数分割多重化方式 (CP-OFDM) と分散フーリエ変換スプレッド OFDM (DFT-S-OFDM) の 2 つの方式があります[1]。

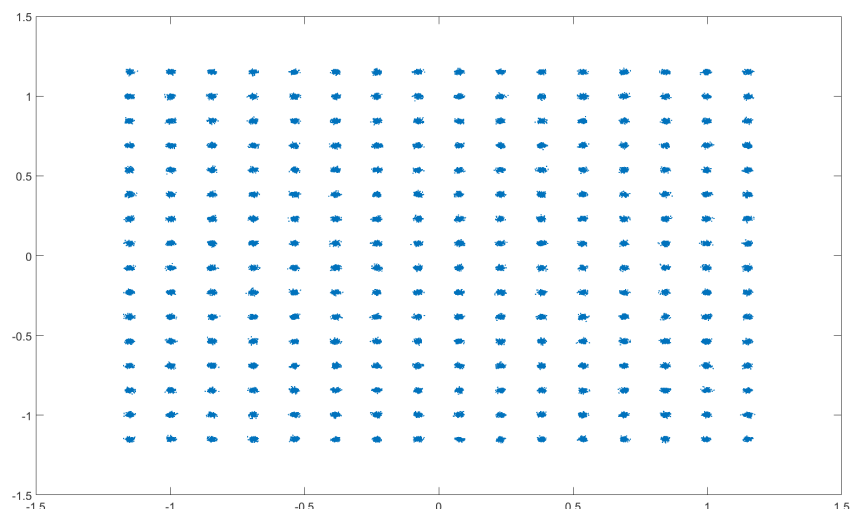


図 4 : Advantest V93K でキャプチャした 256-QAM の 5G NR コンステレーション・プロット

CP-OFDM はダウンリンク (D/L) 向けで四位相偏移変調 (QPSK)、16-QAM、64-QAM、256-QAM があります。高いスペクトル効率を持ち、MIMO および 4G LTE と互換性があります。DFT-S-OFDM は、 $\pi/2$ -二位相偏移変調 (BPSK)、16-QAM、64-QAM、256-QAM のアップリンク (U/L) 向けです。CP-OFDM に比べて実装が複雑で、リソース割り当ての自由度が低く、MIMO との組み合わせでは使用されません。5G NR 用のサブキャリア・スペーシングは、15kHz から 240kHz の間です。図 4 は 256-QAM プロットを示しています。

5G RF 製品と RFIO

最新のダイレクトおよびヘテロダインコンバータアーキテクチャ[2]には、デジタルベースバンド I/O が搭載されています。デジタルベースバンドは、アナログの同相・直交 (I/Q) 波形を作成するデジタル・アナログ変換器 (DAC) にデータを供給します。これらの波形は、局部発振器 (LO) 信号と混合されると、データをアップコンバートして受信機 (Rx) に送信される変調された中間周波数 (IF) または RF 信号を生成します。信号の送信は、同軸シールドケーブル経由または無線で行われます。特に無線で行われる際には、送信に先立って信号の増幅を必要とする場合があります。また、受信機は、ダウンコンバート用の信号を供給する前に、受信した信号を増幅することができます。ダウンコンバートされた信号は、アプリケーション・プロセッサで処理するために信号をデジタル・ベースバンドに変換するアナログ/デジタル・コンバータ (ADC) に供給されます。これらのステップを図 5 に示します。

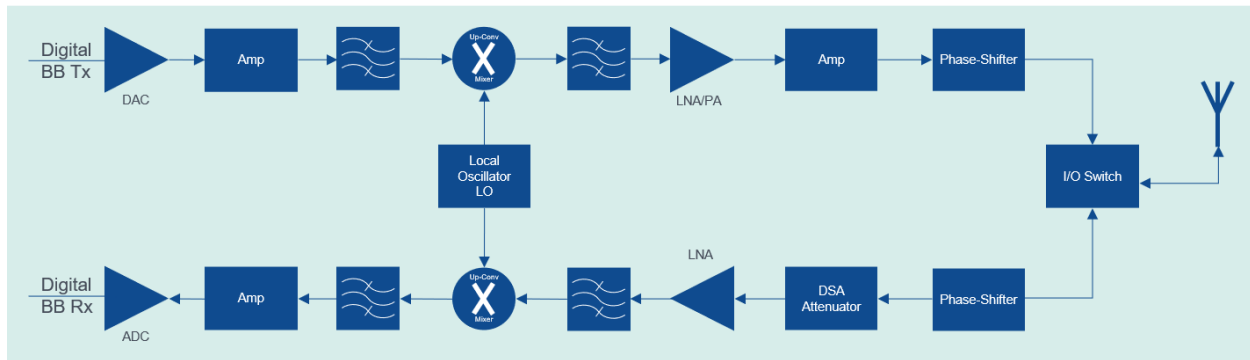


図 5：簡略化された送信機 (Tx) と受信機 (Rx) の RF チェーンブロック

垂直統合型デバイスメーカー (IDM) のお客様からは、様々な RF 製品の組立てやテストサービスに関するご相談を受けます。これには、トランシーバ、低雑音増幅器 (LNA)、パワーアンプ (PA)、デジタルステップアッテネータ (DSA)、フィルター、およびミキサーが含まれますが、これらに限定されません。対象となるアプリケーションによっては、RF 入力と出力のチャンネル数が異なる場合があります。帯域幅、位相雑音、変調間歪み (IMD)、位相と振幅の分解能/精度、その他のテスト要件も異なる場合があります。

被試験デバイス (DUT) の送信機特性仕様には、送信電力と高周波放出 (占有帯域幅、帯域外発射、隣接チャンネル漏洩電力比 (ACLR) および IMD) が含まれます。量産テスト向けの DUT の受信機特性仕様には、受信感度、最大入力レベル、隣接チャンネル選択性、ブロッキング、スプリアス応答、および IMD が含まれます[1]。

5G RF サブシステムを搭載した自動検査装置 (ATE) テスターとツーリング

Advantest、Teradyne、National Instruments および Cohu の 4 社は実績のある ATE 製品のアップグレード用パスを公開しました。Amkor は、生産工場でお客様の製品を検査するために、ATE の RF サブシステムのハードウェアおよびソフトウェアインフラを利用しています。

ATE ベンダーは通常、顧客の検査アプリケーション開発のために、装置リソースのユニバーサルなスーパーセット構成を構築します。任意波形発生器 (AWG)、デジタイザ (DGT)、LO、フィルター、アンプ、トーンコンバイナ、送信信号スプリッター、受信信号スイッチの数、およびそれらの広い帯域幅と動作のダイナミックレンジは、各顧客の新しい 5G RF アプリケーションごとに考慮しなければならないトレードオフを提示しています。計器設計によるアプリケーション固有の周波数と振幅での位相雑音は、エラーベクターマグニチュード (EVM) テストに直接影響を与えます。連続波 (CW) 周波数の 5G レンジでは、オフセット 100kHz で -110dBc/Hz および -10dB 以上の位相雑音が許容されます (代表値)。一般的なブロードバンド製品アプリケーションでは、周波数と振幅を切り替える必要がありま

す。切り替え時間は、テストリストの実行時間全体に影響します。量産テストでは、切り替え時間の少ないテスターが最も効率的です。図6は、ATEのブロック図です。

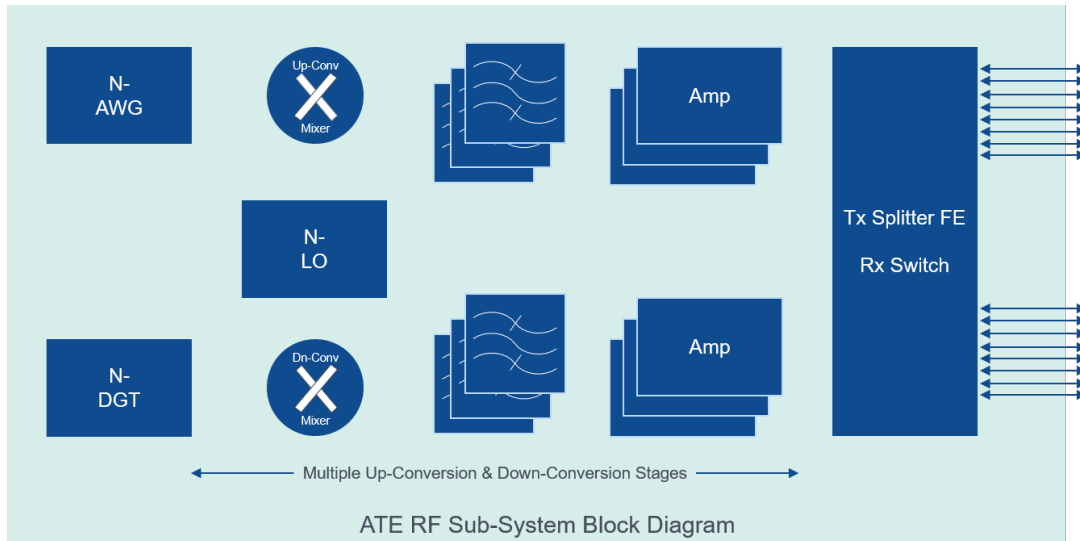


図6：簡略化された ATE ブロック図

テスターのリソースをデバイスのピンやバンプにルーティングするためには、カスタムのツーリング（プローブカードおよび（または）ロードボード）を開発する必要があります。ウェハプローブサービスのため、プローブカードのベンダーがプローブピン技術を提供しています。50GHz を超える 5G の RF キャリア周波数の場合、インピーダンス整合、ピン間およびサイト間の信号分離などの課題があります。パッケージ部品、ロードボード、ソケット、およびソケットピン技術のベンダーが、ピンに関する技術を提供しています。5G の RF キャリア周波数については、プローブピンについて説明したものと同様の課題があります。これらの周波数における挿入損失（S-パラメーター S21）の許容レベルは、通常-10dB 以下であり、周波数範囲での反射損失（S11）は、通常-10dB よりも優れています。一般的なアプリケーションでのピン間絶縁の許容レベルは、周波数範囲で-45dB よりも優れています。

RF の性能と精度の仕様は、テストヘッドの信号配信インターフェイスへの供給により保証されています。テスターサプライヤーは、キャリブレーションシステム（ハードウェアおよびソフトウェア）を開発して提供し、仕様の範囲内で性能をキャリブレート、検証、診断します。RF 機器の精度仕様は温度変化に敏感です。多くの場合、温度の $\pm 5^{\circ}\text{C}$ （またはそれ以上）の変化が機器の自己キャリブレーションルーチンの誘因となります。電源、信号（デジタル、アナログ/RF）およびクロックを使用するには、キャリブレーションプレーンをテストヘッドからデバイスピンまで移動する必要があります。このパスには、プローブカードまたはロードボード上のトレースが含まれます。弊社には、デエンベッド技術を採用してループバックを使用するか、またはカスタム開発のショート、オープン、ロード、スルー（SOLT）構造を使用して、必要な RF 信号の精度を被試験デバイスに提供できるという独自のメリットがありま

す。キャリアレーション用のカスタム規格を開発するにはさらなる努力が必要ですが、社内パッケージ設計がとり組めば、実現の可能性があります。ほとんどの場合、ゴールドループバック DUT 技術で十分な精度が得られています。

組立検査の関連性

弊社の組立部門とテスト部門は密接に連携して、5G RF エンジニアリング開発と量産テストを可能にします。そのメリットは、同じ工場の中で完全な組立と検査のターンキーソリューションを提供できることです。アンテナ・イン・パッケージとアンテナ・オン・パッケージ (AiP/AoP) SiP を提供する 5G パッケージは、2018 年 7 月に Amkor によって最初に製造され、2019 年のプレスリリースで発表されました[3]。

最近のパッケージング技術の進歩により、5G トランシーバや RF フロントエンド (RFFE) デバイスのような RFIC は、パッケージ内にアンテナが埋め込まれている可能性があります。同様に、システム・イン・パッケージ (SiP) デバイスは、プロセッサ、メモリ、RFIC ペリフェラル、電力増幅器、低雑音増幅器、位相アレイ、アンテナ構造などのディスクリートコンポーネントのような関連コンポーネントを IC パッケージ内に同梱しています[4]。アンテナはフロントエンドの重要なコンポーネントであり、動作の特定の周波数帯に合わせてチューニングする必要があります。現在設計されている 5G NR FR2 対応の顧客製品は、3GPP 仕様[1]で定義されているように、特定の動作帯域で性能が調整されています。データ量の多いアプリケーションでは、パッケージ内に複数の無線機を内蔵する必要があり、動作周波数帯ごとにチューニングされた複数のアンテナが必要になる場合があります。

前世代と現世代の RF デバイスのすべての量産テストは導電性がありました。DUT と RF I/O は、ケーブルとシールドプリント基板 (PCB) のマイクロトレース経路でインピーダンス制御されたパスによりテスターの RF に電気的に接続されています。上記のように、5G RF テストソリューションを開発しているすべての ATE サプライヤーには、導電性 RF 同軸インターコネクタが含まれています。アンテナを内蔵したパッケージの大規模量産を可能にするため、テスト手法には、信号損失を最小限に抑えて RF エネルギーの送受信が可能なインターコネクタが必要です。アンテナ送信理論[7]では、送信機と受信機間の空間的な分離を最小限に抑える必要があります。この分離はキャリア周波数に依存します。RF I/O チャンネルの数とマルチサイトテストの要求により、量産テストの複雑さが増します。現在検討されている検査のオプションには、パッチアンテナやホーンアンテナ、ビームフォーミング IC (BFIC)、エンベデッド指向性カプラ、導波管などがあります。これらのソリューションは、いずれも大量生産に適したものではなく、アンテナの数が増えれば増えるほどスケラブルになるというものでありません。これは主に、テスターのインターフェイスのハンドラーに物理的なスペースが必要なことに起因します。

IDM は、トランシーバ上でループバックのデザイン・フォー・エクセレンス (DfX) モードを可能にするデザイン構造を設計しており、量産テスト装置の要件を簡素化してコストメリットに貢献しています。パッケージ内にアンテナを埋め込むことで小型化と全体的な統合が可能になりますが、キャリア周波数の新しい 5G NR 動作帯域のアプリケーションの最終的な性能調整の柔軟性は失われます。当社は引き続き、供給業者や顧客と協力して、生産検査のためのオーバーザエア (OTA) テストの課題を解決していきます。

付加価値の提案

大きく分けると、テストモデルには主に 2 つのモデルがあります。一つ目は、お客様がすべてのテスト内容を管理し、5G RF テスト機器のコンサインなどを行って Amkor に製造を委託するモデルです。二つ目は、量産テストを可能にするために、当社がお客様の要望に応じたエンジニアリングサービスを提供することです。この場合、弊社のテスト開発チームはお客様と密接に連携し、お客様のテスト開発エンジニアリング (TDE) 要件のカスタムニーズに対応します。付加価値 TDE サービスの例としては、以下のものがありますが、これらに限られるものではありません。

- 最適な 5G 対応テスターの選択
- 最適なプローバやハンドラーの選択
- 特にマルチサイトの量産テストのために、テスターのリソースを適切に割り当てができる最適な 5G テストツール (プローブカード、ロードボード) の設計
- 顧客の機能テスト仕様書に従った生産検査プログラム、検査パターン、テスト波形の開発とデバッグ
- 製品認定
- 製品特性検査のルーチン
- 歩留まりの最適化、低歩留まり不良解析、製品設計のフィードバック、(不良解析は、例えば、製造および組立パッケージングの欠陥の根本原因を決定するために、X 線またはデラミネーションを必要とする場合があります)
- 完成品も効率的に取り扱えるカスタムのバックエンドフロー

RF テスト開発エンジニアリンググループは、前世代および現世代の RF 技術のテストソリューションとテストコンテンツを開発してきた豊富な経験を持ち、この専門知識に基づいて、これらの 5G 検査の課題を解決し続けています。同グループでは、FR1、FR2 の両 RF スペクトラムにおいて、基地局やモバイル 5G の RF 製品のテストソリューションの作成および提案に積極的に関わっています。これらの検

査ソリューションは、上記の 3GPP 規格に対応した ATE ハードウェアおよびソフトウェアの検査ツールを使用しています。

量産テストプロセスは、長年にわたって実績を重ね、5G RF 生産検査に製造のための設計 (DFM) を可能にしています。5G RF 量産テストの結果を収集、分析、保持することは、検査方法、フロー、内容を段階的に改善するために不可欠です。特定のケースでは、テストエンジニアは IC 設計や製造プロセスのエンジニアに貴重なフィードバックを提供しています。テスト機器全体にわたるマルチサイトの 5G RF 検査結果に対して統計的なビンリミット (SBL) を設定することで、システムの機器関連の誤動作を特定し、要因を排除するのに役立ちます。これにより、テスト機器の最適な稼働率が確保され、全体的な生産スループットが向上します。

お客様の多くの製品は、市場投入までの時間 (TTM) が定まっており、知的財産 (IP) の問題やセキュリティに敏感です。そのような顧客の懸念をすべて処理するために、実績あるシステムとプロセスが配置されています。

Amkor の量産テストは、今後数年で予想される大量の 5G 製品のテストに向けて準備を進めてきました。これには、ユーザー機器 (モバイル機器) の成長に先行することが予想される 5G 基地局やインフラ機器が含まれます。

サマリー

5G の RF 量産テスト事業は規模が大きく、急速に成長しています。弊社の量産テストチームは、アセンブリパッケージング、ATE サプライヤー、お客様と密接に連携して、すべての技術的能力とキャパシティの課題を満たし、総合的な 5G RF 量産テストサービスが利用できるよう準備して参りました。

© 2021, Amkor Technology, Inc. All rights reserved.

参考資料

1. [3GPP TS 38.101-1 V16.1.0 \(2019-09\)](#)
2. 広帯域 RF アーキテクチャのオプション - - Peter Delos、[アナログデバイス](#)
3. - Amkor デバイスパッケージ - <https://amkor.com/packaging/>
4. アンテナ・イン・パッケージ / アンテナ・イン・アンテナ - <https://c44f5d406df450f4a66b-1b94a87d576253d9446df0a9ca62e142.ssl.cf2.rackcdn.com/2019/08/AiP-AoP-TS116.pdf>
5. Amkor アンテナ・イン・パッケージ - [Article](#)
6. [Amkor Packages - プレスリリース 2019](#)

7. [Fresnel Far Field Region](#) または [アンテナ理論](#)