



IQ キャプチャ、ストリーミング 最適なビット分解能

高性能ハンドヘルド スペクトラムアナライザ
フィールドマスタ プロ MS2090A

目次

目次

はじめに	3
アナログ信号受信機の限界	3
信号のデジタル化に伴う制限.....	3
サンプルレート.....	3
量子化ノイズ.....	4
量子化ノイズと熱雑音	6
量子化ノイズに対するサンプルレートの影響.....	6
量子化ノイズに対するビット分解能の影響	6
スペクトラムアナライザのリファレンスレベル.....	7
IQ キャプチャ測定例	7
MS2090A における考察	9
タイムスタンプ	10
まとめ	10

はじめに

IQ キャプチャは、無制限のビット分解能とサンプルレートが与えられた場合、任意の期間に対して RF 信号を完全再現できます。しかし現実には、ビット分解能やサンプルレートが増加するとビット数やデータ量が増え、ギガバイトクラスのストレージと数十ギガビット/秒のストリーミング帯域幅を消費します。また、現実にはキャプチャデータすべてにノイズが含まれます。ビット分解能やサンプルレートの増加は、ある時点から、ノイズを正確に再現するのに役立つだけとなり、信号の再現には寄与しなくなります。このホワイトペーパーでは、この背後にあるメカニズムを説明します。

アナログ信号受信機の限界

理想的な、アナログ信号の受信機は、受信信号の帯域幅に比例してノイズも測定されます。RF 波やマイクロ波において、熱雑音は周波数に対して比較的平坦で、およそ-174dBm/Hz と近似できます。これは、1 Hz の帯域をキャプチャした場合、熱雑音は-174 dBm ですが、1MHz の帯域をキャプチャすると、熱雑音は 10^6 倍、つまり-114dBm になるということを意味します。受信機の性能が理論的なノイズの限界にどれだけ近いかは、ノイズフィギュア（雑音指数）規格によって示されます。

一方、受信機にはノイズフィギュアの制限に加えて、どれだけのパワーを正確に受信可能かにも制限があります。これは、ダイナミックレンジと呼ばれる規格です。入力する RF パワーが大きいと、受信機に入力される信号は抑圧されます。抑圧されると、キャプチャしたデータが実際の信号値に完全には等価ではなくなってしまいます。ダイナミックレンジは、受信可能な入力信号の最大値と最小値の比率です。ダイナミックレンジは、使用する分解能帯域幅（RBW）に依存します。スペクトラムアナライザでは、一般的に、狭い RBW の方が広い RBW よりも高ダイナミックレンジになります。

信号のデジタル化に伴う制限

キャプチャしたアナログ信号のデジタル化にも制限があります。デジタル信号は「量子化（アナログ信号のデジタルでの数値化）」されます。アナログ信号は最も近いビットに丸められ、これにより「量子化ノイズ」と呼ばれるノイズが発生します。

一方、一定の値を持つ固定信号は、デジタル値が表現可能な最大整数を超えた場合には、その最大整数に取り込まれてしまいます。一般には、デジタル信号が最大整数まで取り込まれる前にアナログ信号が抑圧され、同時に量子化ノイズがアナログノイズよりも小さくなるような信号のデジタル化を実施します。

このような入力アナログ信号のデジタル化を実施した場合、それ以上のビット拡張（ハイサイドまたはローサイドのいずれか）はビットまたはストレージを浪費するだけです。ほとんどのスペクトラムアナライザの受信機は、デジタル処理するレベルに合わせて、入力アナログ信号を利得調整しています。スペクトラムアナライザはこの処理を自動的に実施します。

サンプルレート

サンプルレートが高いほど、キャプチャできる帯域幅が広がります。実際の信号キャプチャの場合、ある信号を標本化（サンプリング）する場合の基準には、サンプルレートが帯域幅の 2 倍である必要があります。IQ キャプチャの場合、各サンプルポイントに「I」と「Q」の両方のサンプルがあるため、サンプルレートを入力信号の帯域幅より若干大きくします。ただし、サンプリングするフィルタは完全ではなく、フィルタの遷移帯域（カットオフ周波数）にいくらかの帯域幅を割り当てる必要があるため、使用可能な帯域幅はサンプルレートよりも小さくなります。ほとんどのスペクト

ラムアナライザは、各サンプルレートで使用可能な帯域幅を公開しています。サンプルレートが高すぎると、その分のビット処理は無駄になるので、必要な帯域幅を持つ最小限のサンプルレートを設定することが望ましいです。

量子化ノイズ

IQ キャプチャにとって量子化ノイズは重要な項目です。前述したように、入力アナログ信号が最も近いビットに丸められたときに生じる誤差です。ビット数が多いほど量子化ノイズは少なくなり、ビットが増えるごとに量子化ノイズが 6.02dB 減少します。最下位ビットが熱雑音や広帯域信号によって複雑で不規則な予測のできない変化の場合、量子化ノイズは「ホワイトノイズ」、つまりすべての周波数に様に広がっています。量子化ノイズがこの性質を持つ場合、他のノイズと同じように扱うことができます。分解能帯域幅（RBW）を小さくすると量子化ノイズが減り、狭帯域の信号を狭い帯域幅で簡単に識別することができます。

以下の図 1、2 は、MATLAB と同様のフリーの信号処理ツールである Gnu Octave で作成されたシミュレーション信号を解析したものです。これらの図では、振幅 1000 のピークツーピーク（正弦波交流の最大値と最小値の差）の CW 信号が 10 ビットに量子化されています（したがって、フルスケールは-512 から+511 になります）。少量のホワイトノイズが重畳されています。図 2 は図 1 を拡大したものです。

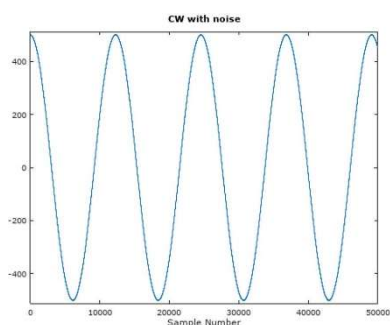


図 1

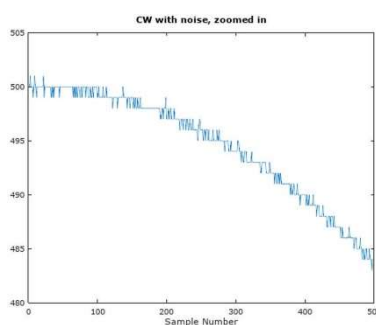


図 2

信号振幅は 500、量子化ノイズの振幅は 0.5 なので、SNR は約 60dB となります。量子化ノイズはサンプルレートと同じ帯域幅に広がっています。サンプルレートが 122.8MHz の場合、1MHz の RBW を使用して量子化ノイズを信号レベルより 80dB 低くすることができます。（図 3）。

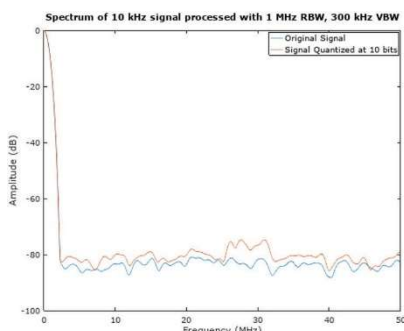


図 3

図 3 で、オレンジ色の波形は量子化された信号のスペクトラムであり、青色のトレースは少量のホワイトノイズを含む元の信号のスペクトラムです。

同じデータに対して、狭い RBW を使用した場合、量子化ノイズは-110dB 程度まで小さくなります（図 4）。

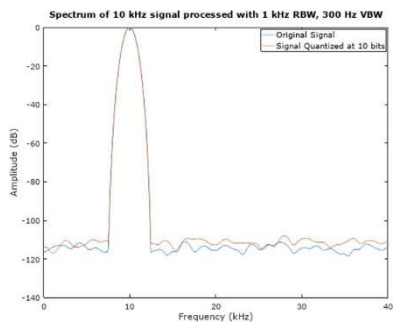


図 4

また、10 ビットの量子化にもかかわらず、1 ビットよりも小さい振幅の信号が解析されることがあります（図 5、6）。同じホワイトノイズを加えて、正弦波の振幅を 500 から 0.4 に変更すると、初めの 500 サンプルは、図 6 の様になります。

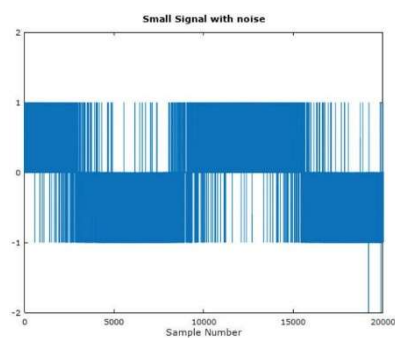


図 5

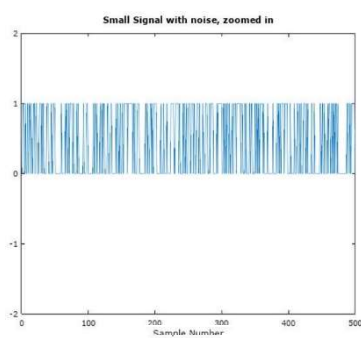


図 6

RBW が 100 Hz のスペクトラムは図 7 の様になります。ここでは、10 kHz の正弦波がはっきりと見え、ノイズより 50dB 以上強くなっています。

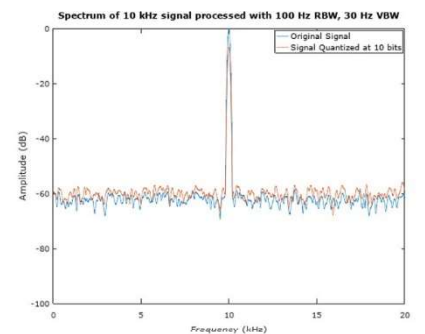


図 7

強い信号の近傍に弱い信号がある場合、次の図 8、9 では、振幅が 500 の 10 kHz と振幅が 0.05 の 11 kHz の CW 信号を入力したものです。11 kHz の信号は、非常に小さい信号で生データから観測することはできません。

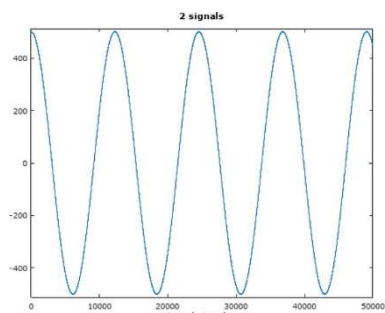


図 8

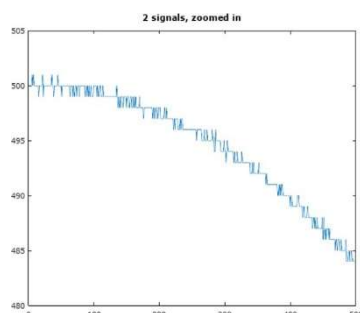


図 9

図 10 では、RBW が 100 Hz で、11kHz の信号が主信号の 80dB 下に正しく表示されています。

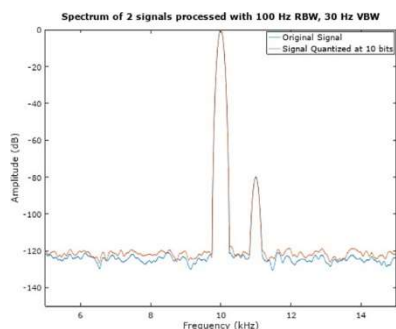


図 10

このように、量子化ノイズはホワイトノイズ、つまり広帯域のノイズと同じように振る舞います。RBW を狭くすることで、量子化ノイズの量を減らすことができます。

しかし、量子化ノイズが全くホワイトノイズ化していない場合もあります。入力信号のアナログノイズが非常に小さくて振幅が 1 ビットに比べて小さい場合、ビット切り替えが起こらず、量子化ノイズがホワイトノイズ化していない場合があります。上記ではこの問題を回避するために、少量の「アナログ」ホワイトノイズをそれぞれのケースで重畳しました。この少量のアナログノイズは、ランダムにビットを反転させ、信号と相関させる代わりに、量子化ノイズをホワイトノイズ化します。

量子化ノイズと熱雑音

量子化ノイズと信号との相関関係がない場合、量子化ノイズと熱雑音は同じ方法で信号を劣化させます。これらのエネルギー密度は単純に加算されます。量子化ノイズを熱雑音よりも十分に小さくすることができれば、量子化ノイズは無関係になります。

デジタルシステムの設計目標は、量子化ノイズを他のノイズより 10dB 小さくすることです。量子化ノイズが大きいと、信号に悪影響を与えます。量子化ノイズが十分小さい場合は、量子化ノイズを正確に表現する余分なビットは、データサイズを増大する以外に何もせず、実用的ではありません。デジタルシステムの量子化ノイズは、アナログノイズより十分に低い値にすることが困難な場合もあります。これは測定を無効にするのではなく、システム性能がデジタル性能によって制限されていることを意味しています。

量子化ノイズに対するサンプルレートの影響

量子化ノイズのエネルギーは、キャプチャしたデータのスペクトラム全体に広がっています。サンプルレートを 2 倍にすると、同じ量のエネルギーが 2 倍のスペクトラムに分散されるため、量子化ノイズのエネルギー密度は 1/2 になります。実際には、非常に高いサンプルレートでは、それほど高いビット分解能を必要とせず、100MSPS で 16 ビット以上は通常不要です。

量子化ノイズに対するビット分解能の影響

前述の考察からサンプルレートが高いほど量子化ノイズのエネルギー密度は低下しますが、通常はビット分解能が高い方が効率的です。1 ビット増えた場合、量子化ノイズのエネルギー密度が 6dB 低下します。サンプルレートを 2 倍にすると、量子化ノイズのエネルギー密度は 3 dB 減少します。したがって、200MSPS、10 ビットのキャプチャは、

25MSPS、12 ビットのキャプチャと同じ量子化ノイズエネルギー密度になります。

ゆえに、システム設計は、解析処理が必要な信号をキャプチャするために必要最小限のサンプルレートを選択し、量子化ノイズがアナログノイズよりも低くなるようにビット分解能を選択します。

スペクトラムアナライザのリファレンスレベル

スペクトラムアナライザには、信号のレベルを最適化するためのアナログアンプとアッテネータがあります。限られたビット数を最大限に活用するために、スペクトラムアナライザの受信利得を微調整します。入力信号が高すぎると、信号はビットをオーバーフローします。例えば、MS2090A はこのような状況で「ADC オーバーレンジ」を表示します。このような場合は、手動でアッテネータを増すか、リファレンスレベルを上げることで、より高いアッテネータ値を設定します。入力信号が低い場合は、信号に比べて量子化ノイズが高くなります。

スペクトラムアナライザのリファレンスレベルは、通常、入力信号がオーバーレンジしないように選択されます。一般的に広帯域信号は、RBW 内の信号エネルギーよりも受信機の ADC に入力されるエネルギーの方が多くなります。これに対応するために、オーバーレンジするレベルにスペクトラムアナライザのリファレンスレベルを合わせるのではなく、オーバーレンジするレベルの数 dB 下にリファレンスレベルを設定します。

測定される信号が狭帯域の場合、ビットを最も効率的に使用するには、リファレンスレベル以上の信号を入力します。一般的には、スペクトラムアナライザがオーバーレンジを表示するまで内部の減衰器を減らすか、プリアンプを入れて入力信号のレベルを調整し、キャプチャ中にオーバーレンジしないように 5dB のアッテネータを追加することで、最適な入力レベルを設定します。

IQ キャプチャ測定例

図 1 1、1 2、1 3 は、MS2090A で指定されたサンプルレートとビット分解能でキャプチャした信号です。入力信号は CW です。入力信号は MS2090A のリファレンスレベルより高いレベルで入力されましたが、解析範囲を適正・最大にするために「ADC オーバーレンジ」レベルより低いレベルに調整しました。IQ データを MS2090A でキャプチャ後、データ解析は Gnu Octave で実施しました。RBW と VBW は Gnu Octave で設定します。

図 1 1 は、ビット分解能によってノイズフロアがどのように変化するかを示しています。キャリア信号付近では、信号と受信機の位相ノイズの組み合わせが 8 ビット量子化ノイズを上回るため、この付近では 8 ビットで十分です。キャリア信号から 10MHz ほど離れると、8 ビット量子化ノイズはアナログノイズフロアよりも明らかに高くなり、測定に影響を及ぼしています。この例の 200 MSPS のキャプチャでは、110 MHz の広い通過帯域を持つアナログフィルタを使用しています。キャリア信号から 70 MHz ほど離れると、アナログフィルタのために受信機はアナログ信号を受信できなくなり、8 ビット、10 ビットなどの低ビット分解能の量子化ノイズが確認されるようになります。これらの周波数では入力したアナログ信号がフィルタリングされているため、エッジ付近の低いノイズフロアは実際の測定では重要ではありません。このサンプルレートでは、実際の測定には通常 10 ビットで十分です。16 ビットと同様の結果を得るために 32 ビットでキャプチャすることは、明らかに過剰です。

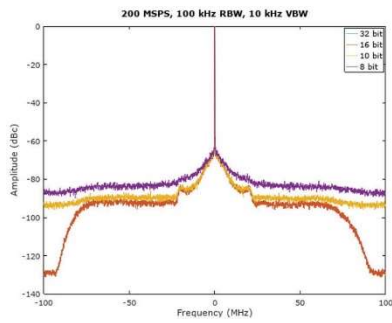


図 1.1

サンプルレートが 12.5MSPS でも、量子化ノイズよりも信号と受信機の位相ノイズの方が大きいため、10 ビットでも十分です (図 1.2)。

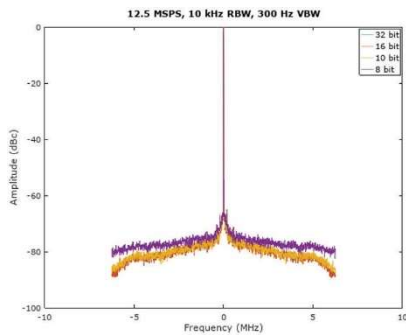


図 1.2

8 ビットでも 100 dB 以上のダイナミックレンジが可能です。図 1.3 は 8 ビットキャプチャでも 90dBc のスプリアスが明確に確認できる例です。このプロットでは、8 ビットの量子化ノイズがサンプルレート 122.88MHz に広がっている場合に、1kHz の RBW で解析を行っています。他の種類のノイズと同様に、ノイズと比較した CW 信号のダイナミックレンジは使用する RBW に依存し、RBW を狭くするほどダイナミックレンジが大きくなります。

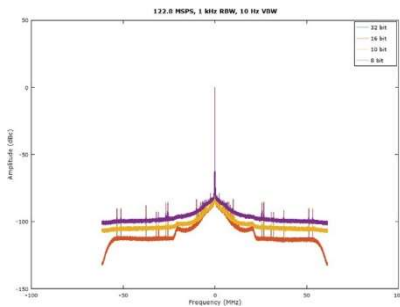


図 1.3

MS2090A における考察

MS2090A は、最大 2GB のデータをキャプチャして保存できます。低いサンプルレートまたは帯域幅を選択すると、より長い時間のキャプチャを実施できます。表 1 は、2 GB のキャプチャ容量を使用したとき、何秒のデータを保存できるかを示しています。

		ビット分解能			
		32	16	10	8
サンプルレート	200	1.34	2.68	4.02	5.36
	122.88	2.18	4.36	6.55	8.73
	100	2.68	5.36	8.04	10.7
	12.5	21	42	64	85
	0.045	5965	11930	17895	23860

表 1 保存できるデータ量 (秒)

MS2090A は、ユーザが選択したイーサネット/USB3/高速データポートを介してデータをストリーミングすることもできます。このデータはファイルに取り込まれ、詳細解析のために PC アプリケーション（例えば Bird Spectro-X など）で後処理（測定後のデータ解析）されます。ストリームされたデータは連続的に送信されますが、送信チャネルまたは受信デバイスの帯域幅によって、データを損失することなく使用できるサンプルレートまたはビット分解能が制限される場合があります。送信チャネルやストレージがストリーミング速度に対応できない場合、ストリームにはランダムな場所にデータギャップが生じ、データ解析が困難になります。データギャップが測定者に認識されていない場合、データギャップの境界における不連続性は、スペクトラム全体にエネルギーを人為的に拡散し、望ましくないスペクトラムを生成します。データギャップを含む 1 つの非常に大きなデータストリームよりも、場合によっては、複数に分けたキャプチャの方が機能する可能性があります。

表 2 は、さまざまなサンプルレートでの推奨ビット分解能を示しています。“過剰”と表示されたセルは、余分なビットが測定を改善する可能性が非常に低いことを示しています。“不足”と表示されたセルは、量子化されたビット分解能が測定を劣化させる可能性が高いことを示しています。“状況次第”と表示されたセルは、量子化ノイズが測定に大きく影響することはほとんどありませんが、特定のタイプの信号では影響する可能性があることを示しています。

ビット分解能

		32	16	10	8
サンプルレート	200	過剰	過剰	最適	状況次第
	122.88	過剰	最適	最適	不足
	100	過剰	最適	最適	不足
	12.5	過剰	最適	不足	不足
	0.36	最適	最適	不足	不足
	0.045	最適	状況次第	不足	不足

表 2

タイムスタンプ

MS2090A には、IQ データにタイムスタンプを追加するオプションがあります。この機能がオフの場合、データサンプルは影響を受けません。この機能がオンになっている場合、多くのデータサンプルの最下位ビット（LSB）がデータではなくタイムスタンプによって上書きされます。ビット分解能が 32 ビットでは、LSB はノイズの中にあり、無関係です。16 ビットでは、ほとんどのサンプルレートで LSB はノイズの中にあり、重要ではありません。ビット分解能が 10 ビットのときはデータフォーマットが 32 ビットごとに 3 サンプルで構成されており、タイムスタンプは 2 つの未使用ビットのうちの 1 つに埋め込まれています。そのため 10 ビットもタイムスタンプの影響を受けません。しかし、ビット分解能が 8 ビットの場合、データフォーマットが 4 つのサンプルのうち 1 つのビットがタイムスタンプによって上書きされます。そのため 8 ビット、タイムスタンプオンの場合に量子化ノイズが著しく増加します。

まとめ

本稿では、IQ キャプチャ用に設計されたシステムにおけるノイズ、サンプルレート、ビット分解能の関係について説明しました。これらの相互依存性を理解することで、IQ データをキャプチャする際に、MS2090A などの受信機の設定を最適化して、結果として得られるデータファイルのサイズを最小化することができます。一般的に、ファイルが小さいほど、後処理（測定後のデータ解析）ツールでの解析が容易になるため、すべての信号の識別が迅速かつ容易になります。



お見積り、ご注文、修理などは、下記までお問い合わせください。
記載事項は、おことわりなしに変更することがあります。

アンリツ株式会社

<https://www.anritsu.com>

本社 〒243-8555 神奈川県厚木市恩名5-1-1 TEL 046-223-1111
厚木 〒243-0016 神奈川県厚木市田村町8-5
通信計測営業本部 TEL 046-296-1244 FAX 046-296-1239
通信計測営業本部 営業推進部 TEL 046-296-1208 FAX 046-296-1248
仙台 〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央4-6-1 S S 3 0
通信計測営業本部 TEL 022-266-6134 FAX 022-266-1529
名古屋 〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南2-14-19 住友生命名古屋ビル
通信計測営業本部 TEL 052-582-7283 FAX 052-569-1485
大阪 〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101 大同生命江坂ビル
通信計測営業本部 TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118
福岡 〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田1-8-28 ツインスクエア
通信計測営業本部 TEL 092-471-7656 FAX 092-471-7699

■カタログのご請求、価格・納期のお問い合わせは、下記または営業担当までお問い合わせください。
通信計測営業本部 営業推進部

TEL: 0120-133-099 (046-296-1208) FAX: 046-296-1248
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: SJPost@zy.anritsu.co.jp

■計測器の使用方法、その他については、下記までお問い合わせください。

計測サポートセンター

TEL: 0120-827-221 (046-296-6640)
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。
また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

ご使用前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

2009