

在 UAV 應用中以 SDR 為基礎的高解析度、低延遲影像傳輸

■作者：Wei Zhou/ADI 公司

摘要

整合式 RF 高靈敏發射接收器不僅被廣泛的應用在蜂巢式電話基地台的軟體定義無線電 (SDR) 架構當中像是多業務分佈存取系統 (MDAS) 與小型蜂巢等，也有使用在工業、商業、以及軍事應用的無線 HD 影像傳輸中例如無人機 (UAV) 等。本文將會檢視使用 AD9361/AD9364 整合式發射接收 IC 的寬頻視訊信號鏈執行方案，其中包括了資料傳輸量、相關的 RF 佔用信號頻寬、傳輸距離、以及發射器的功率等。同時也會介紹 OFDM 中 PHY 層的執行方案，並且展示用以避免 RF 干擾的跳頻時間測試結果。最後，我們將會討論寬頻無線應用裝置中 wifi 與 RF 高靈敏發射接收器的優點與缺點。

信號鏈

圖 1 中展示的是使用 AD9361/AD9364 與 BBIC 的簡化無線影像傳輸架構。攝影機擷取影像並透過乙太網路、HDMI、USB、或是其它介面將視訊資料傳輸到基頻帶處理器中。影像的編碼 / 解碼可

以利用硬體或是 FPGA 加以處理。RF 前端包括了切換器、LNA、與 PA 至可編程整合式發射接收器。

有多少資料需要被傳輸

表 1 中所示為未壓縮資料速率與壓縮資料速率之間的顯著差異。透過利用高效率的視訊編碼 (HEVC) 也被稱為 H.265 與 MPEG-H Part 2，我們可以降低資料速率與節省頻寬。H.264 目前是錄影、壓縮、以及影像內容之分佈最為常用的格式之一。此格式在影像壓縮技術上呈現了大幅的邁進，同時也是受到廣為使用之 AVC(H.264 或 MPEG-4 Part 10) 的數種潛在繼任者之一。

$$\text{壓縮資料速率} = \text{未壓縮資料速率} / \text{壓縮比}$$

表 1 中將不同視訊格式的未壓縮資料速率與壓縮資料速率做了一個總結。假設項目包括有 32 位元的視訊位元深度以及 60 fps 的框架速率。在 1080p 的範例中，資料速率是壓縮後 7.45 Mbps，其接下來可以很輕易的由基頻帶處理器與無線 PHY 層加以處理。

圖 1：無線影像傳輸示意圖

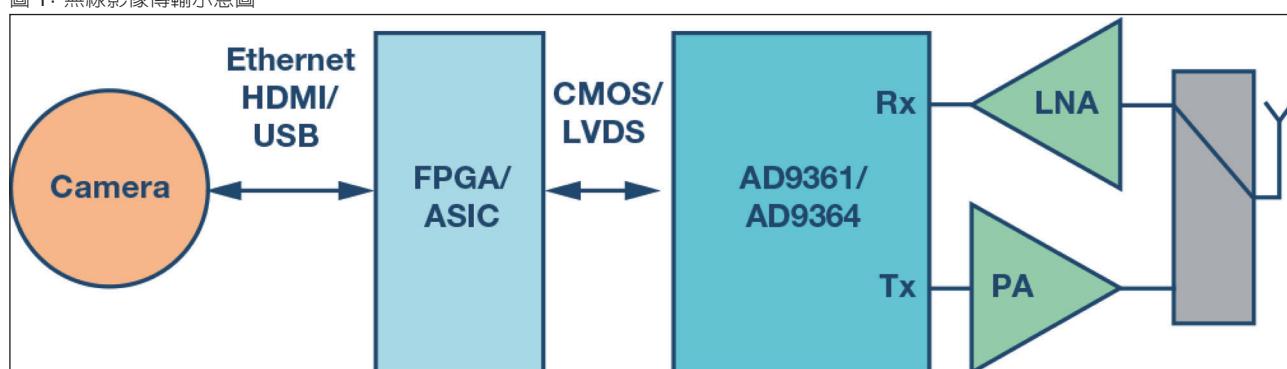


表 1: 壓縮資料速率

格式	水平線	垂直線	像素	未壓縮資料速率 (Mbps)	壓縮資料速率 (Mbps) 壓縮比 = 200
VGA	640	480	307,200	442	2.2
720p	1280	720	921,600	1328	6.64
1080p	1920	1080	2,073,600	2986	14.93
2k	2048	1152	2,359,296	3400	17.0
4k	4096	2160	8,847,360	12,740	63.7

資料包括了真實的以及虛構的部份～分別對應到 I 與 Q，位處相同的頻率頻寬上使頻譜效率比單一零件高了一倍。壓縮視訊資料可以映射到 I 與 Q 通道上以建立星座點～也被稱為符號。圖 2 所示為 16

信號頻寬

AD9361/AD9364 能夠透過改變取樣速率、數位濾波、以及降頻來支援從 200 kHz 以下一直到 56 MHz 的通道頻寬。AD9361/AD9364 是零 IF 發射接收器，以 I 和 Q 通道來傳輸複雜的資料。複雜的

圖 2:16 QAM 星座圖。

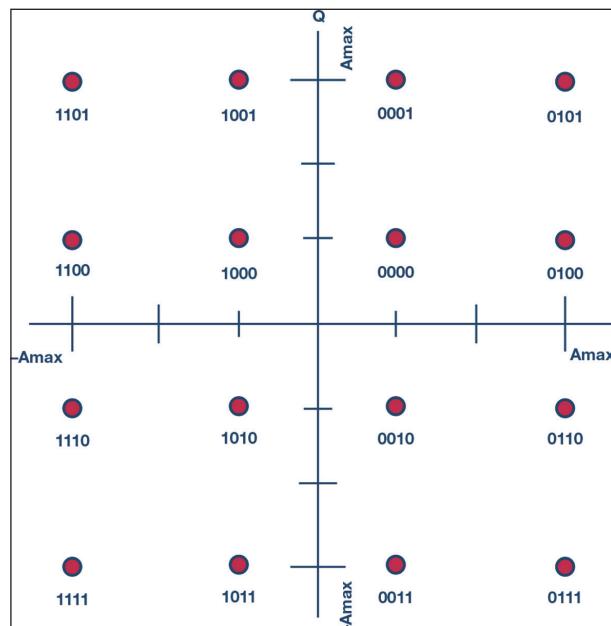
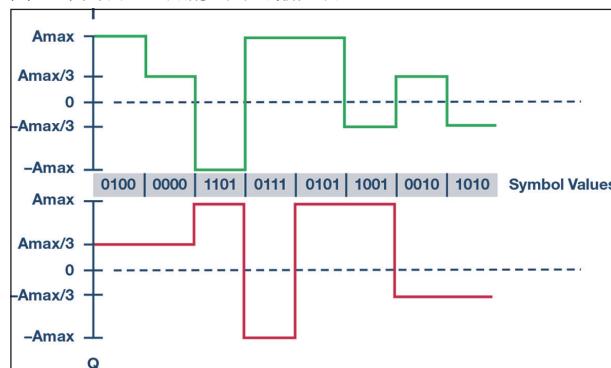
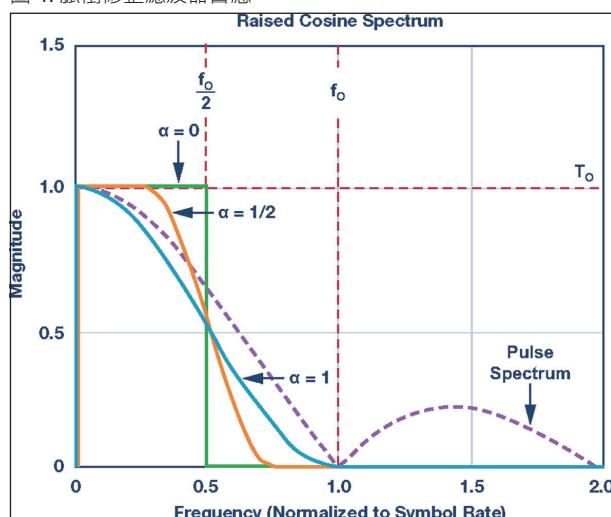


圖 3: 來自於星座點的 I 與 Q 數位波型。



QAM 的範例，其中每個符號都代表了四個位元。

圖 4: 脈衝修整濾波器響應。



對於單一載波系統而言，I 與 Q 數位波型必須要通過位於 DAC 之前的脈衝修整濾波器，藉以將傳輸信號修整在限定的頻寬之內。可以利用 FIR 濾波器來進行脈衝修整，而濾波器響應則如圖 4 中所示。為了要維護資訊的保真度，對應於符號速率的信號頻寬會有最小的限制。而符號速率會與壓縮視訊資料速率成正比，如下面的方程式所示。對於 OFDM 系統而言，複雜資料應該要利用 IFFT 加以調變至子載波，同樣也是在限定的頻寬內傳輸信號。

$$\text{符號速率} = \text{位元速率} / \text{每個符號傳輸的位元數}$$

每個符號傳輸的位元數會依據調變階數而定。

所佔用的信號頻寬為：

$$\text{RF 佔用信號 BW} = \text{符號速率} \times (1 + \alpha)$$

其中 α 為濾波器頻寬參數。

由前面的公式我們可以導出如下的方程式，

$$\text{RF 佔用信號 BW} = \frac{\text{壓縮資料速率}}{\text{每個符號傳輸的位元數}} \times (1+\alpha)$$

因此我們可以計算出如表 2 中所彙整的 RF 佔用信號頻寬

表 2: 各類調變階數的 RF 佔用信號頻寬 ($\alpha = 0.5$)

格式	壓縮資料速率 (Mbps)	QPSK (信號 BW, MHz)	16 QAM (信號 BW, MHz)	64 QAM (信號 BW, MHz)
VGA	2.2	1.375	0.6875	0.4583
720p	6.6	4.1250	2.0625	1.3750
1080p	14.9	9.3125	4.6563	3.1042
2k	17.0	10.6250	5.3125	3.5417
4k	63.7	39.8125	19.9063	13.2708

AD9361/AD9364 具有高達 56 MHz 的信號頻寬，支援表 2 中的所有視訊格式傳輸以及更高的框架速率。更高階的調變會佔用較小的頻寬，而符號

圖 5: 調變階。

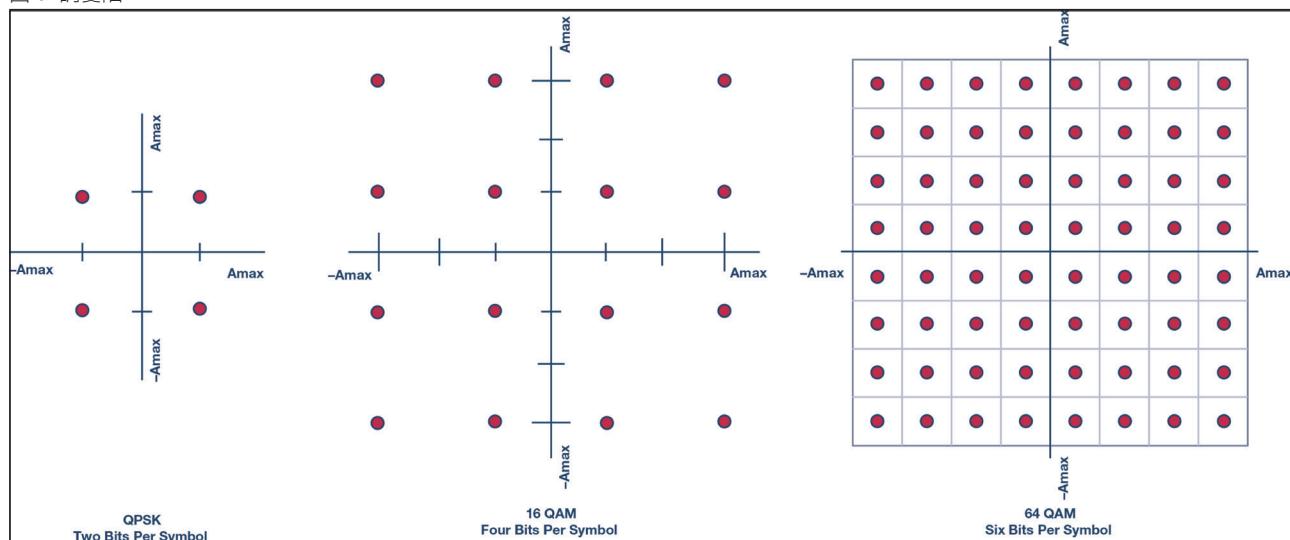
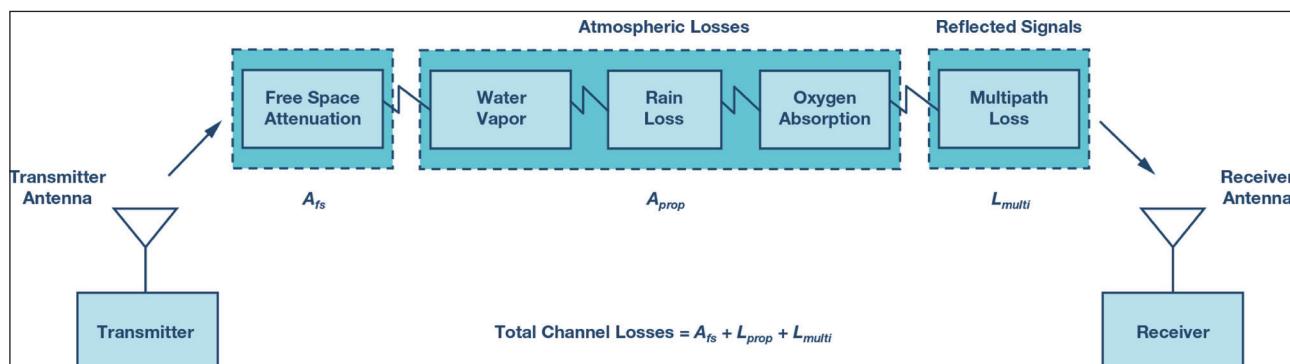


圖 6: 無線通訊通道損耗模型。



可以代表更多的資訊 / 位元，但是解調變則需要更高的 SNR。

傳輸距離與發射器功率

在 UAVs 這類的

應用裝置中，最大傳輸距離是一項至為重要的參數。然而，同樣重要的是通訊不能夠被截斷，即便是在限定的距離之內。氧氣、水、以及其他阻礙物（除了

自由空間衰減）都能夠使信號衰減。

圖 6 中所示為無線通訊通道耗損模型。

接收器敏感度一般會採用解調變或是復原來自於發射器之資訊所需要的最小輸入信號為依據。在

獲得接收器敏感度之後，最大傳輸距離就可以透過一些假設來加以計算，如下所示：

$$S_{min} = 10\log(kT_0B) + NF + (S/N)_{min} = -174$$

$$\text{dBm} + 10\log B + NF + (S/N)_{min}$$

$(S/N)_{min}$ 是處理信號所需要的最小信號雜訊比

N 是接收器的雜訊係數

k 是波茲曼常數 = 1.38×10^{-23} 焦 / K

T₀ 是接收器輸入的絕對溫度 (Kelvin) = 290 K

B 是接收器頻寬 (Hz)

參數 $(S/N)_{min}$ 會依據調變 / 解調變階數而定。在相同的 SNR 下，較低階數調變會得到較低的符號誤差，而在相同的符號誤差下，較高階數調變則需要較高的 SNR 來進行解調變。因此當發射器距離接收器很遠的時候，信號會較為衰弱而 SNR 無法支援高階解調變。為了要保持發射器處於上線狀態，並且以相同的視訊資料速率維持一種視訊格式，基頻帶應該以增加頻寬為代價來使用較低階的調變。此將有助於確保接收器影像不會模糊。幸好具有數位調變與解調變的軟體定義無線電提供了可以更改調變的能力。先前的分析是以發射器 RF 功率為恆定的假設做為依據。雖然在相同的天線增益下，更大的 RF 發射器功率可以在相同的接收器敏感度狀態下實現更遠距離的接收器，但是最大發射功率仍然應該要依循 FCC/CE 的輻射標準。

此外，載波頻率也會對傳輸距離有所影響。當波在空間中傳播時會因為散射而產生耗損。自由空間耗損可以由下列公式得出：

$$A_{fs} = 20 \log(4\pi R/\lambda) = 20 \log(4\pi Rf/C)$$

其中 R 是距離，λ 是波長，f 是頻率，而 C 是光速。因此，較高的頻率在相同的自由空間距離下會有較多的耗損。舉例來說，5.8 GHz 的載波頻率會衰減超過 7.66 dB，相較於在相同傳輸距離下的 2.4 GHz 的載波頻率。

RF 頻率與切換

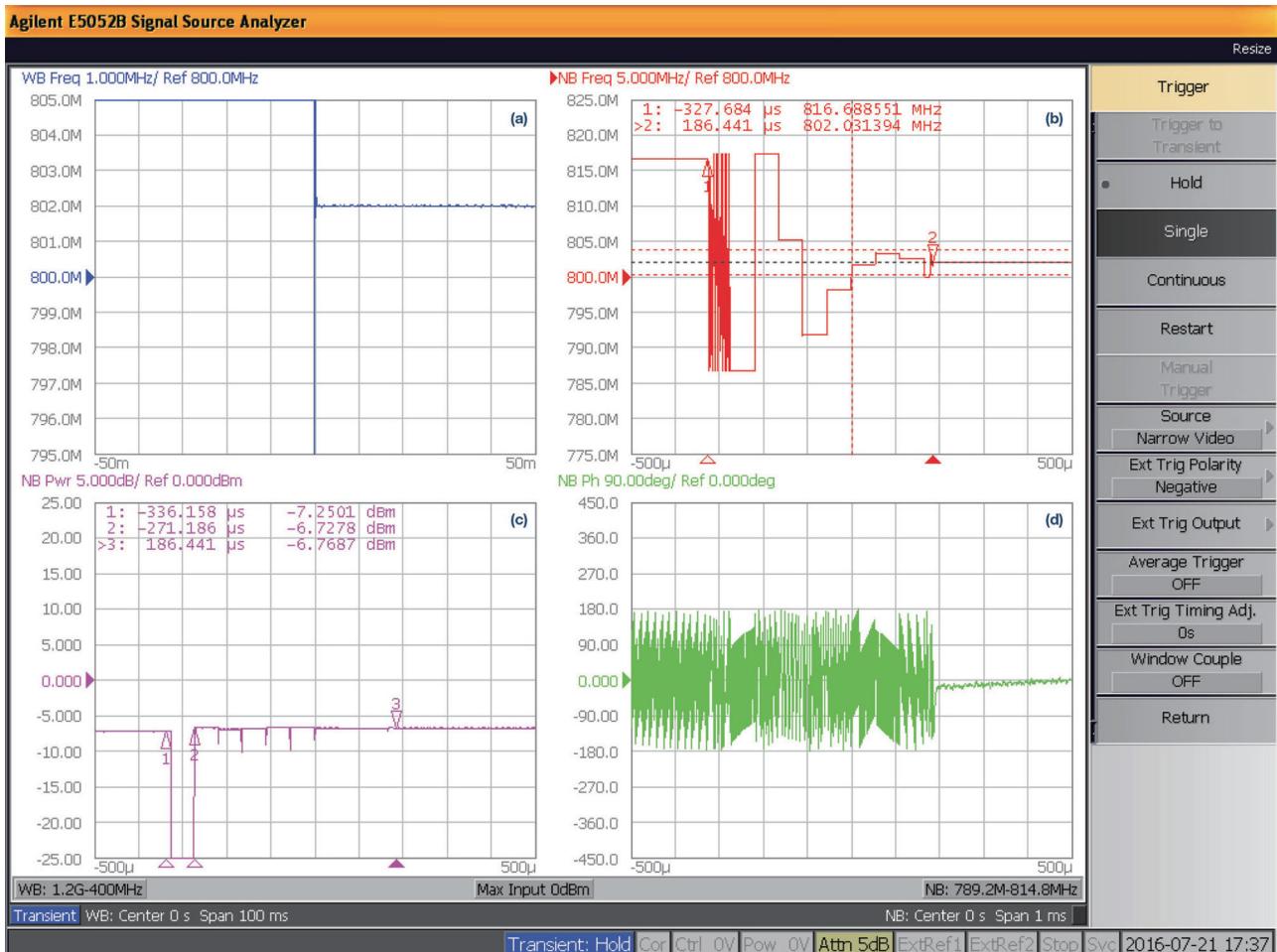
AD9361/AD9364 具有 70 MHz 至 6 GHz 的可編程頻率範圍。此將可以滿足大部分的 NLOS 頻率

應用裝置，其中包括了各種類型的許可與未許可頻率，像是 1.4 GHz、2.4 GHz、以及 5.8 GHz 等。

2.4 GHz 頻率被廣泛使用於 Wi-Fi、Bluetooth、以及 IoT 短距離通訊，進而使其變得很擁擠。利用其做為無線視訊傳輸與控制信號會增加信號干擾與不穩定的機會。而這會對 UAVs 帶來不樂見甚至往往會是危險的情況。使用頻率切換來維持乾淨的頻率將可以使資料和控制連結更加的可靠。當發射器感測到一組擁擠的頻率時，它會自動的切換到另一個波段。舉例來說，兩台 UAVs 使用相近的頻率並且又在很近的距離內操作時，彼此的通訊將會相互干擾。自動切換 LO 頻率與重新選擇波段將有助於維持穩定的無線連結。在電源開啓期間內自適應的選擇載波頻率或通道，是高端 UAVs 的優越特點之一。

跳頻

被廣泛使用於電子電抗 (ECM) 中的快速跳頻也有助於避免干擾。一般來說，假如我們想要跳頻的話，那麼 PLL 必須在程序進行之後重新鎖定。此過程包括了寫入頻率暫存器，然後還有經過 VCO 校正時間與 PLL 鎖定時間，因此跳頻間隔大約是數百微秒。圖 7 所示為發射器的 LO 頻率從 816.69 MHz 跳頻至 802.03 MHz 的範例。AD9361 用於正常頻率變化模式，而發射器 RF 輸出頻率以 10 MHz 的參考頻率從 814.69 MHz 跳頻至 800.03 MHz。跳頻時間的測試是使用如圖 7 中所示的 E5052B。根據圖 7b 中所示，VCO 校正與 PLL 鎖定時間大約是 $500 \mu s$ 。信號源分析器 E5052B 可以用來擷取 PLL 暫態響應。圖 7a 中所示為暫態量測的寬頻模式，而圖 7b 與 7d 則以相當精細的解析度顯示了在跳頻時的頻率與相位。圖 7c 中所示為輸出功率響應。 $500 \mu s$ 對於跳頻應用裝置來說是段很長的時間間隔。然而，AD9361/AD9364 內含有快速時鐘模式，使其能夠藉由將合成器編程資訊 (稱為特性資料) 儲存到元件內的暫存器或是基頻帶處理器的記憶體空間當中，進而實現比一般更為快速的頻率變

圖 7: 以 $500\ \mu\text{s}$ 的時間從 804.5 MHz 跳頻至 802 MHz。

化。圖 8 所示為使用快速時鐘模式執行從 882 MHz 跳頻至 802 MHz 的測試結果。根據圖 8d 中的相位響應，其時間可以縮短到少於 $20\ \mu\text{s}$ 。相位曲線是參照 802 MHz 的相位所繪製的。SPI 寫入時間與 VCO 校正時間在該模式下都可以省去，因為頻率資訊與校正結果都已經存入特性資料當中。我們可以看到，在圖 8b 中所示為 AD9361/AD9364 的快速跳頻能力。

PHY 層的執行方案 — OFDM

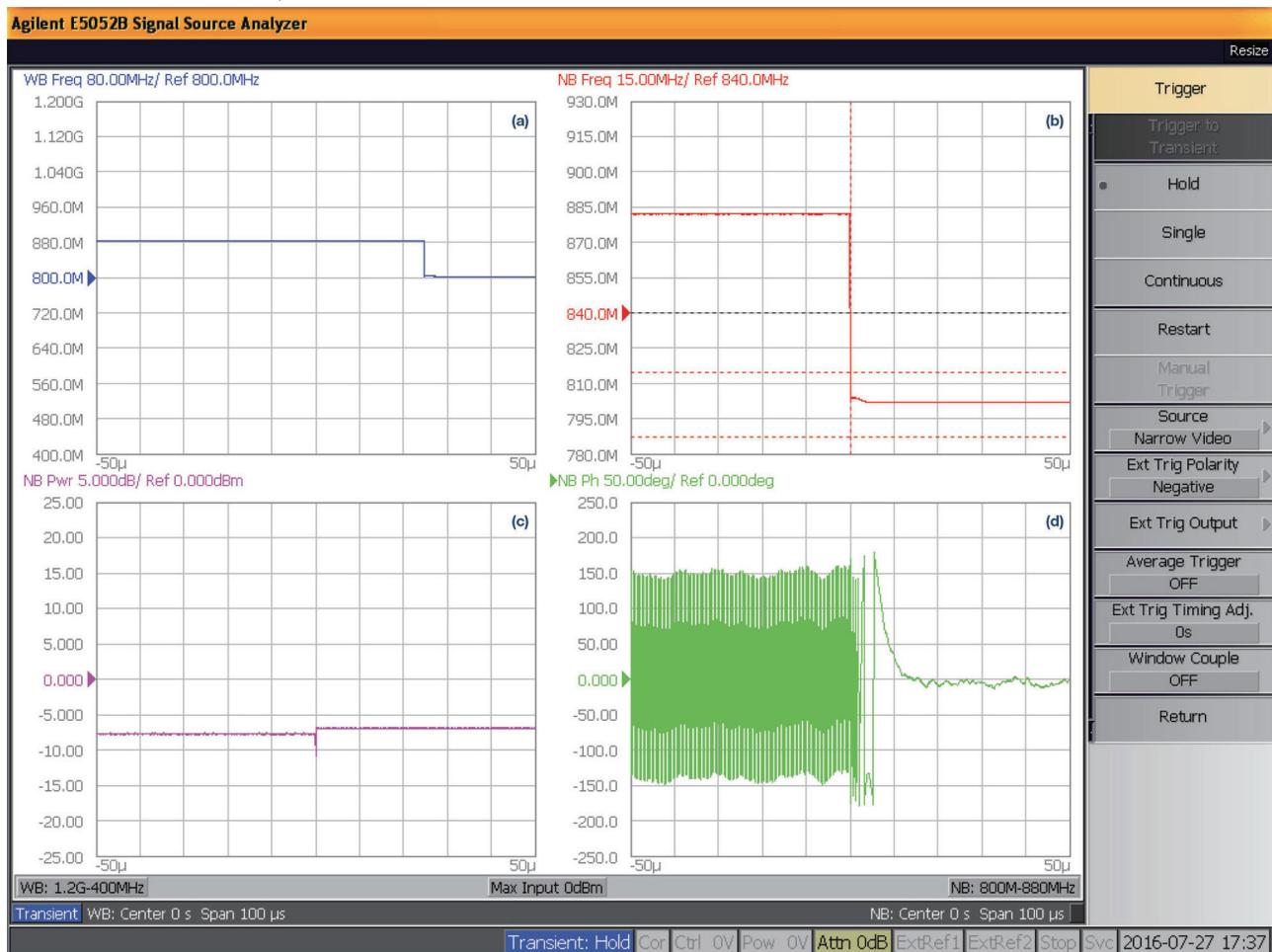
正交頻分多工 (OFDM) 是一種信號調變的形式，將高資料速率調變串流分割成許多慢速調變的窄波段緊密間隔子載波。這將使它對於選擇性的頻率衰落較不敏感。其缺點是較高的峰值對平均功

率比，以及較高的對於載波偏移與漂移的敏感度。OFDM 被廣泛的應用於寬頻無線通訊 PHY 層。OFDM 的關鍵性技術包括了 IFFT/FFT、頻率同步、取樣時間同步、以及符號 / 框架同步等。IFFT/FFT 應該要盡可能透過 FPGA 以最快速的方式來加以執行。選擇子載波的間隔也非常的 important。間隔應該要大到足以承受具有都卜勒頻率的行動通訊，同時又小到能夠在限定的頻率範圍中承載更多的符號，藉以提昇頻譜效率。COFDM 結合了編碼技術與 OFDM 調變。COFDM 以其對於信號衰減的高抵抗能力，加上前向錯誤修正 (FEC) 的優勢，可以從任何移動的物體上傳送視訊信號。編碼會增加信號頻寬，但這通常都是值得加以權衡的。

將 MathWorks 以模型為基礎的設計與自動化編碼產生工具與強大的 Xilinx Zynq SoCs 以及



圖 8: 在快速鎖定模式下以 $20\ \mu s$ 的時間從 882 MHz 跳頻至 802 MHz。



Analog Devices 的整合式 RF 發射接收器加以結合，SDR 系統的設計、驗證、測試、與執行都能夠比以往更有效率，帶來更高性能的無線電系統與縮短上市時間。

在 Wi-Fi 上有哪些優點？

配備了 Wi-Fi 的無人機可以輕易的與行動電話、筆記型電腦、以及其他行動裝置連結，因而使它們非常的易於使用。但是對於 UAV 應用裝置的無線視訊傳輸而言，FPGA 加上 AD9361 的解決方案提供了許多超越 Wi-Fi 的優點。首先，在 PHY 層中，AD9361/AD9364 敏捷的頻率切換與快速的跳頻有助於避免干擾。大部分的整合式 Wi-Fi 晶片在沒有頻率波段重新選擇的機制能夠使無線連結更加穩定的狀況下，也會在擁擠的 2.4 GHz 頻率波段中運作。

其次，使用 FPGA 加上 AD9361 的解決方案，傳輸通訊協定可以由設計者彈性化的加以定義與開發。Wi-Fi 通訊協定是標準協定，而且是以每個資料封包的雙向握手機制為基礎。使用 Wi-Fi 時，每個資料封包必須要確認該封包已經收到，而且封包中的 512 個位元組都是完整的接收。假如有一個位元組遺失了，整個 512 位元組的封包就必須要重新傳送。雖然這個通訊協定可以確保資料的可靠度，但是重新建立無線資料連結是既複雜又費時的。TCP/IP 通訊協定會造成高延遲，進而導致非即時的視訊與控制，而這將會使 UAV 發生墜毀的狀況。SDR 解決方案 (FPGA 加 AD9361) 使用單向的資料串流，此代表著飛行在天上的無人機會像 TV 廣播一樣的發送視訊信號。當目標是即時視訊時，就不會有時間重新傳送封包。

此外，Wi-Fi 無法為許多的應用裝置提供適當位準的安全性。藉由使用加密演算法則以及使用者定義的通訊協定，FPGA 加 AD9361/AD9364 的解決方案比較能遠離安全方面的威脅。

再者，單向廣播資料串流提供的傳輸距離能力是 Wi-Fi 方案的兩到三倍。由軟體定義無線電能力所提供的彈性讓數位調變 / 解調變調整可以滿足距離上的需求或 / 與調整，藉以在複雜空間輻射環境中改變 SNR。

結論

本文說明了使用 FPGA 加 AD9361/AD9364 解決方案做為高解析度無線視訊傳輸執行方案中的關鍵參數。透過敏捷的頻率波段切換與快速的跳頻，將可以建立更加穩定與可靠的無線連結以抵抗日趨複雜的空間輻射，並降低墜毀的機率。在通訊協定層部份，該解決方案更具彈性，使用單向傳輸以降低無線連結的建立時間並且提供較低延遲的連結。在像是農業、電力線檢查、監督等工業與商業應用領域中，穩定、安全、以及可靠的傳輸對於成功而言是至為重要的。

參考資料

- 1 Software-Defined Radio Solutions from Analog Devices.
- Analog Devices, Inc.
- 2 AD9361 data sheet. Analog Devices, Inc.
- 3 AD9364 data sheet. Analog Devices, Inc.
- 4 Ken Gentile. Application Note AN-922, Digital

Pulse-Shaping Filter Basics.

Analog Devices, Inc.

5 Scott R. Bullock. Transceiver and System Design for Digital Communications, 4th edition. SciTech Publishing, Edison, NJ, 2014.

6 E5052B Signal Source Analyzer, Advanced Phase Noise and Transient Measurement Techniques. Agilent, 2007.

7 Di Pu, Andrei Cozma, and Tom Hill. "Four Quick Steps to Production:

Using Model-Based Design for Software-Defined Radio." Analog Dialogue, Volume 49, 2015.

8 John Locke. "Comparing the DJI Phantom 4's Lightbridge vs. Yuneec Typhoon H's Wi-Fi." Drone Compares

作者介紹：

Wei Zhou [Wei.Zhou@analog.com] 是ADI公司應用工程師，支援RF發射接收器產品與應用裝置的設計與開發，特別是在無線視訊傳輸與無線通訊領域方面。他在ADI位於中國北京的中央應用中心工作已經有五年之久，負責支援各種產品包括DDS、PLL、高速DAC/ADC、以及時鐘等。在加入ADI之前，他在2006年於中國武漢的武漢大學取得學士學位，接著在2009年於中國北京的中國科學院(CAS)電子學研究所取得碩士學位。他在2009年至2011年間擔任過一家航太技術公司的RF與微波電路和系統設計工程師。

「智慧應用開發論壇」

敬邀入座

詳請：<http://www.facebook.com/lookcompotech>