

无人飞行器应用中基于SDR的高分辨率、低延迟视频传输

作者: Wei Zhou

分享    

摘要

集成式射频 (RF) 捷变收发器不仅广泛用于蜂窝电话基站的软件定义无线电 (SDR) 架构, 如多业务分布式接入系统 (MDAS) 和小基站单元等, 也适用于工业、商业以及军事应用中的无线高清视频传输, 如无人飞行器 (UAV) 应用。本文将剖析使用AD9361/AD9364^{2,3}集成式收发器IC实现宽带无线视频信号链的过程, 以及传输的数据量、相应的RF占用信号带宽、传输距离和发射功率。文中还将描述OFDM物理层的实现, 并列出于避免射频干扰的跳频时间测试结果。最后, 我们将讨论Wi-Fi和RF捷变收发器在宽带无线应用方面的优缺点。

信号链

图1所示为采用AD9361/AD9364和BBIC的简化无线视频传输方案。摄像机捕捉到影像, 并通过以太网、HDMI®、USB或其他接口将视频数据发送至基带处理器。图像编码/解码可通过硬件或FPGA处理。RF前端包括RF开关以及连接到可编程集成式收发器的LNA和PA。

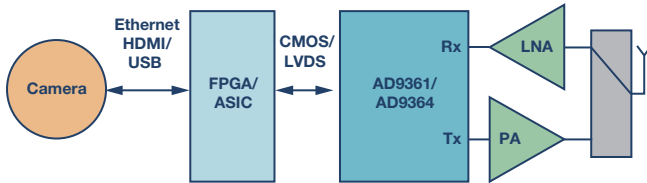


图1. 无线视频传输示意图。

需要传输多少数据

表1列出了未压缩数据速率和压缩数据速率之间的显著差异。通过使用高效视频编码 (HEVC) 技术, 也就是H.265和MPEG-H第2部分, 可以降低数据速率并节省带宽。H.264是目前最常用于录像、压缩及视频内容分布的格式。它体现了视频压缩技术的巨大进步, 并且在未来有可能接替现已广泛使用的AVC (H.264和MPEG-4第10部分) 技术。

$$\text{压缩数据速率} = \frac{\text{未压缩数据速率}}{\text{压缩数据速率}}$$

表1总结了不同视频格式下的未压缩和已压缩数据速率。其假设条件是视频的位深度为24位, 帧速率为60 fps。在1080p的例子中, 压缩后的数据速率为14.93 Mbps, 这样的数据率才会更加容易被基带处理器和无线物理层进行处理。

表1. 压缩数据速率

格式	水平向	垂直向	像素	未压缩数据速率 [Mbps]	压缩数据速率 [Mbps] 压缩比 = 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

信号带宽

通过改变采样速率、数字滤波器和抽取参数, AD9361/AD9364可支持的通道带宽范围为低于200 kHz到56 MHz。AD9361/AD9364为零中频收发器, 具有用来发射复数数据的I通道和Q通道。复数数据含有实部和虚部, 分别对应I通道和Q通道, 它们位于同一频带上, 因此其频谱效率是单通道频谱效率的两倍。压缩视频数据可以映射到I和Q通道以创建星座点, 也就是符号。图2显示了一个16 QAM的例子, 每个星座点符号代表四个二进制比特。

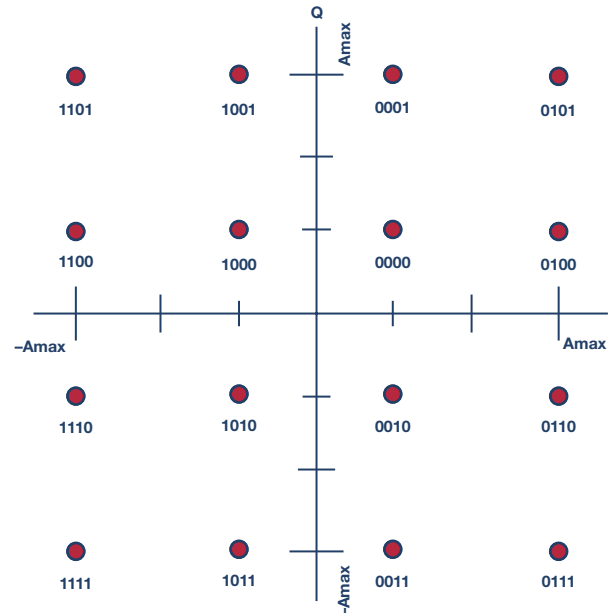


图2. 16 QAM星座图。⁴

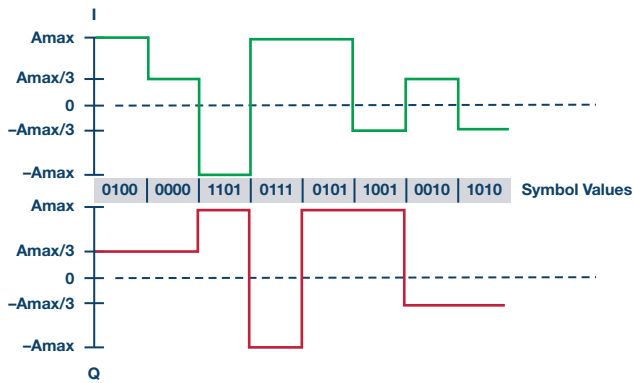


图3. 星座图中I和Q数字波形。⁴

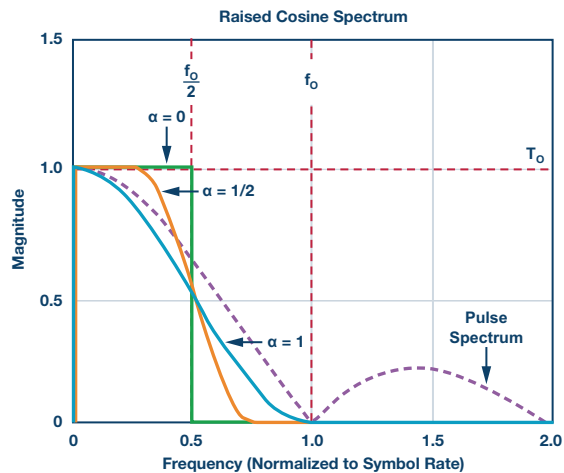


图4. 脉冲整形滤波器响应。⁴

对于单载波系统，I和Q数字波形在进入DAC之前需要通过脉冲整形滤波器，使所传输的信号在有限带宽内成形。脉冲整形可使用FIR滤波器，滤波器响应如图4所示。为了确保信息逼真度，必须满足对应于符号速率的最小信号带宽。符号速率与压缩视频数据成正比，如下式所示。对于OFDM系统，应使用IFFT将复数数据调制到

各个子载波上，使其在有限带宽内传输信号。

$$\text{码元率} = \frac{\text{位速率}}{\text{每个符号传输的位数}}$$

每个符号对应的位数取决于调制阶数。

所占用信号带宽为

$$\text{RF 占用信号带宽} = \text{码元率} \times (1 + \alpha)$$

其中 α 表示滤波器的带宽参数。

根据前面的公式，可以推导出

$$\text{RF 占用信号带宽} = \frac{\text{压缩数据速率}}{\text{每个型号传输的位数}} \times (1 + \alpha)$$

从而，我们可以计算出RF占用信号带宽，如表2中的总结所示。

表2. 各种调制阶数的RF占用信号带宽 ($\alpha = 0.25$)

格式	压缩数据速率 (Mbps)	QPSK (信号带宽, MHz)	16 QAM (信号带宽, MHz)	64 QAM (信号带宽, 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	12.740

AD9361/AD9364可实现56 MHz信号带宽，支持表2中所有视频格式的传输，并且支持更高的帧速率。高阶调制占用的带宽更小，每个码元可表示更多的信息/位，但是解调所需的信噪比 (SNR) 更高。

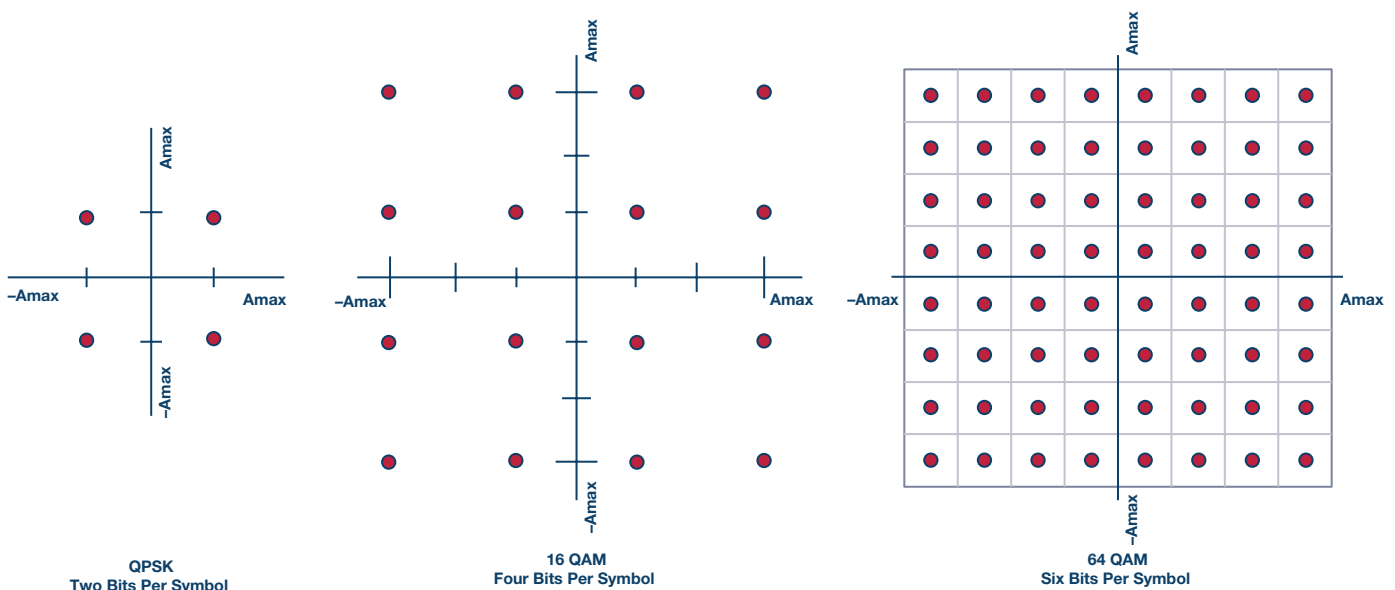


图5. 调制阶数。

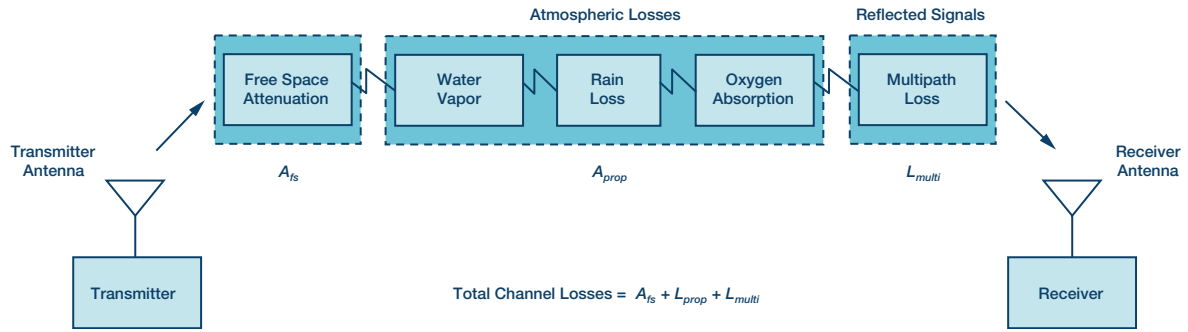


图6. 无线通信通道损耗模型。⁵

传输距离和发射器功率

在无人飞行器等应用中，最大传输距离是一个关键参数。但是，保持通信不中止同样很重要，即使距离较小时也是如此。氧气、水和其他障碍物（自由空间衰减除外）可能会使信号衰减。

图6显示了无线通信通道损耗的模型。

通常将解调或恢复发射器信息所需的最小输入信号 (S_{min}) 作为接收器灵敏度。获得接收器灵敏度后，结合某些假设条件可计算出最大传输距离，如下所示：

$$S_{min} = 10\log(kT_0B) + NF + \left(\frac{S}{N}\right)_{min} = -174 \text{ dBm} + 10\log B + NF + \left(\frac{S}{N}\right)_{min}$$

$(S/N)_{min}$ 表示处理信号所需的最小信噪比

NF 表示接收器的噪声系数

k 表示玻尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} joule/k

T_0 表示接收器输入的绝对温度（开尔文）= 290 K

B 表示接收器带宽（单位Hz）

参数 $(S/N)_{min}$ 与调制/解调阶数相关。在相同的信噪比下，低阶调制可得到更低的误码率，而在相同的误码率下，高阶调制需要更高的信噪比来解调。因此，如果发射器离接收器很远，则接收到的信号较弱，信噪比不足以支持高阶解调。为了使发射器保持在线状态，并使视频格式保持同一视频数据速率，则基带应使用低阶调制，其代价是增加带宽。这样有助于确保接收到的图像清晰不模糊。幸运的是，我们可通过具有数字调制和解调功能的软件定义无线电来改变调制方式。上述分析基于这样的假设条件：发射器的RF功率保持恒定。在天线增益相同时，较大的RF发射功率将能达到更远处具有相同接收灵敏度的接收器，尽管如此，最大发射功率应符合FCC/CE辐射标准。

此外，载波频率也会对传输距离产生影响。当波在空间中传播时，会发生散射损耗。自由空间损耗可由下式确定

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

其中R为距离， λ 为波长，f为频率，C为光速。因此，在相等的自由空间距离上，频率越高，损耗越大。例如，相较于2.4 GHz，载波频率为5.8 GHz时在相同传输距离上的衰减将超过7.66 dB。

RF频率和频率切换

AD9361/AD9364输出覆盖70 MHz至6 GHz的可编程频率范围。这将能满足大多数NLOS频率应用，包括不同类型的特许执照和免执照频段，比如1.4 GHz、2.4 GHz和5.8 GHz。

2.4 GHz频段已广泛用于Wi-Fi、Bluetooth®以及物联网（IoT）短程通信，因此变得越来越拥挤。该频段用于无线视频传输和控制信号将会增大信号干扰的几率和不稳定性。从而导致无人飞行器陷入不良情况，这些情况往往十分危险。使用频率切换技术保持干净的频率通道，将确保数据和控制连接更可靠。当发射器觉察到拥挤频率时，它会自动切换到其他频带。例如，两架同时使用相同频率并且近距离工作的无人飞行器将会相互干扰对方的通信。自动切换LO频率并重新选择频带将有助于维持稳定的无线链路。在上电期间自适应选择载波频率或通道是高端无人飞行器的一个杰出特性。

跳频

广泛应用于电子对抗（ECM）的快速跳频技术也有助于避免干扰。通常情况下，如果我们想要跳频，PLL需在程序执行后重新锁定。该过程包括写频率寄存器，然后经过VCO校准时间和PLL锁定时间，因此跳频间隔约为几百微秒。图7显示了跳频发射器的LO频率从816.69 MHz跳变至802.03 MHz的例子。AD9361用于正常频率变化模式，发射器RF输出频率从814.69 MHz跳变至800.03 MHz，参考频率为10 MHz。跳频时间通过E5052B测得，如图7所示。根据图7b，VCO校准和PLL锁定时间约为500 μ s。信号源分析仪E5052B可用来捕捉PLL的瞬态响应。图7a显示了瞬态测量的宽带模式，而图7b和7d以显著高分辨率显示了跳频时的频率和相位瞬态测量值。⁶图7c则显示了输出功率响应。

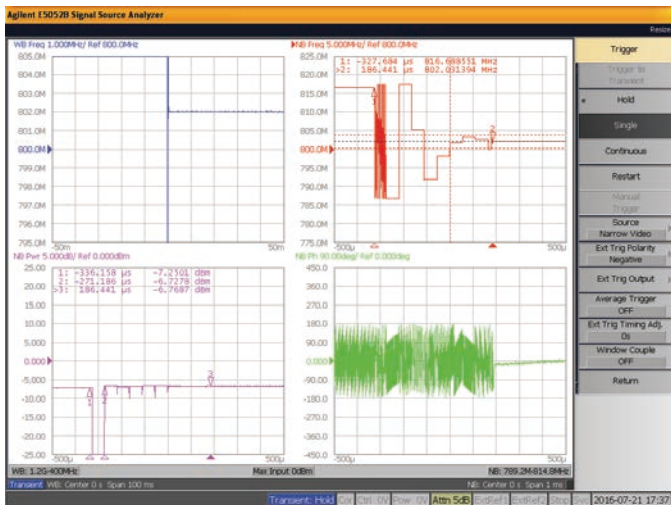


图7. 频率从804.5 MHz跳变至802 MHz, 历时500 μ s。

500 μ s对于跳频应用来说是一段很长的时间间隔。不过, AD9361/AD9364支持一种快速锁定模式, 通过将合成器编程信息集(称为配置文件)存入器件寄存器或基带处理器的存储空间, 可使该过程比正常频率变化更快。图8显示了通过快速锁定模式使频率从882 MHz跳变至802 MHz的测试结果。根据图8d的相位响应, 该时间可缩短至20 μ s以下。相位曲线参照802 MHz的相位绘制。由于频率信息和校准结果均已保存在配置文件中, 因此省去了SPI写入时间和VCO校准时间。我们可以看到, 图8b显示了AD9361/AD9364的快速跳频性能。

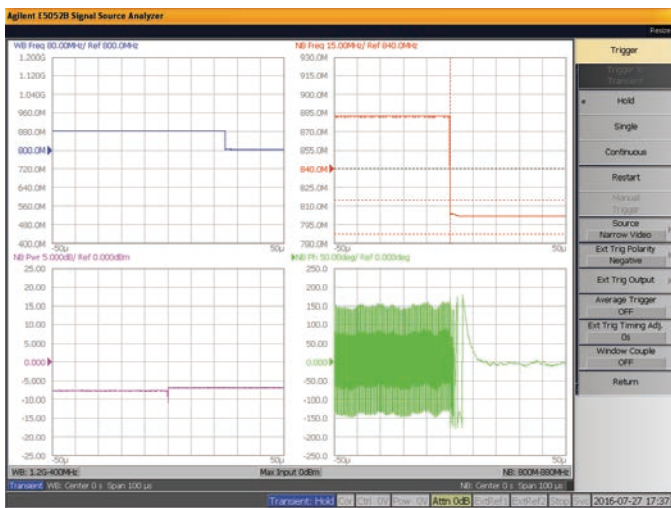


图8. 在快速锁定模式下, 频率在20 μ s内从882 MHz跳变至802 MHz。

物理层的实现—OFDM

正交频分多路复用 (OFDM) 是一种信号调制技术, 可将高数据速率调制流划分到多个缓慢调制的窄带密集的子载波上。因此, 信号不易受到选择性频率衰减的影响。其缺点是峰均功率比较高, 并且对载波偏移和漂移比较敏感。OFDM广泛应用于宽带无线电通信物理层。OFDM的关键技术包括IFFT/FFT、频率同步、采样时间同

步、码元/帧同步。IFFT/FFT可通过FPGA以最快方式实现。子载波间隔的选择也十分重要。该间隔不应太小, 应足以对抗运动通信中的多普勒频移; 但也不应太大, 以便在有限的频率带宽内携带更多码元符号, 从而提高频谱效率。COFDM是指编码技术和OFDM调制的结合。COFDM对信号衰减的承受能力较强, 并且具有前向纠错 (FEC) 功能, 因此可以从任何移动对象发送视频信号。其编码技术将会增大信号带宽, 但此代价通常是值得的。

通过将MathWorks基于模型的设计和自动生成代码工具与强大的Xilinx® Zynq SoC以及ADI公司的集成式射频 (RF) 收发器相结合, SDR系统的设计、验证、测试和实现可以比以前更高效, 进而提高无线电系统的性能并缩短上市时间。⁷

相较于Wi-Fi具有哪些优势?

配备Wi-Fi的无人飞行器可以很容易地连接到手机、笔记本电脑和其他移动设备, 因此使用起来非常方便。但是, 对于无人飞行器应用中的无线视频传输, FPGA和AD9361解决方案具有很多胜过Wi-Fi的优点。首先, AD9361/AD9364在物理层可通过捷变频率切换和快速跳频避免干扰。而大多数集成Wi-Fi芯片仍工作于拥挤的2.4 GHz频带, 没有频带选择机制来确保更稳定地无线连接。

其次, 若采用FPGA和AD9361解决方案, 可由设计工程师灵活定义和开发传输协议。而Wi-Fi协议为标准协议, 基于每个数据包的双向握手机制。在使用Wi-Fi时, 每个数据包必须确认该包已收到并且包中512字节数据在收到时完整无缺。如果丢失一个字节, 则整个512字节数据包必须重新发送。⁸虽然该协议能够确保数据的可靠性, 但重新建立无线数据链路的过程非常复杂且费时。TCP/IP协议带来的高延迟将会造成非实时视频和控制, 从而可能导致无人飞行器坠落。而SDR解决方案 (FPGA加AD9361) 使用一个单向数据流, 也就是说, 空中的无人飞行器可像电视广播一样传输视频信号。当目标是获取实时视频时, 就没有重新发送数据包的时间。

再者, 对于很多应用, Wi-Fi不能保证适当的安全等级。FPGA加AD9361/AD9364解决方案利用加密算法和自定义协议, 因此不易受到安全威胁的影响。

与此同时, 单向广播数据流可实现的传输距离是Wi-Fi传输距离的两至三倍。8软件定义无线电的灵活性使得数字调制/解调可以根据距离需求而调整, 并且适应复杂空间辐射环境中变化的SNR。

结论

本文阐述了使用FPGA和AD9361/AD9364解决方案实现高清无线视频传输的关键参数。凭借捷变频段切换和快速跳频技术, 可建立一个更稳定、可靠的无线链路, 以对抗空间中日益复杂的辐射环境并减小坠落几率。在协议层, 该解决方案使用单向传输以缩减无线链路的建立时间并实现低延迟连接, 因此更灵活。在农业生产、电力线检查及监督等工商业应用中, 稳定、安全和可靠的传输是成功的关键。

参考文献

- ¹ ADI的软件定义无线电解决方案。ADI公司。
- ² AD9361 数据手册。ADI公司。
- ³ AD9364 数据手册。ADI公司。
- ⁴ Ken Gentile。应用笔记AN-922：数字脉冲整形滤波器基本知识。ADI公司。
- ⁵ Scott R. Bullock。数字通信的收发器和系统设计，第4版。SciTech Publishing, Edison, NJ, 2014。
- ⁶ E5052B信号源分析仪，高级相位噪声和瞬态测量技术。安捷伦公司，2007年。
- ⁷ Di Pu、Andrei Cozma和Tom Hill。“快速通往量产的四个步骤：利用基于模型的设计开发软件定义无线电。”模拟对话，第49卷，2015年。
- ⁸ John Locke。“DJI Phantom 4的Lightbridge技术对比Yuneec Typhoon H的Wi-Fi技术。”Drone Compares。

Wei Zhou [Wei.Zhou@analog.com] 是ADI公司的应用工程师，负责支持射频收发器产品和应用的设计与开发，尤其是无线视频传输和无线通信领域。他目前就职于中国北京的ADI技术支持中心，五年来一直在为各种产品提供技术支持，包括DDS、PLL、高速DAC/ADC以及时钟。加入ADI公司之前，他于2006年获得武汉大学学士学位，于2009年获得中国科学院（CAS）电子学研究所硕士学位。2009年至2011年，他在一家航天科技公司担任射频和微波电路与系统设计工程师。



Wei Zhou