

大規模 MIMO 與波束成形： 在 5G 流行語背後的信號處理

■作者：Claire Masterson/ADI 公司

簡介

我們對於高速行動資料的熱切渴望是永遠不會滿足的。當我們滿足於現有密集城市環境中的 RF 頻譜時，顯而易見的是如何提高從無線基地台發射與接收資料的效率是有其必要的。

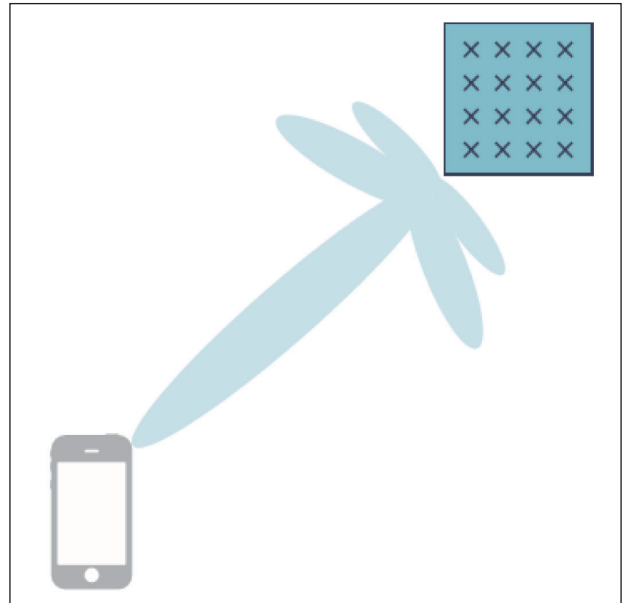
基地台由大量天線組成，在相同頻率資源上同時與多個空間分離的用戶終端進行通信，而利用多重路徑傳播是實現此種節省效率的選項之一。此項技術往往被稱為大規模 MIMO(多重輸入，多重輸出)。你可能已經聽過以大量天線的波束成形加以描述的大規模 MIMO。但這也帶出了一個問題…什麼是波束成形？

波束成形 vs. 大規模 MIMO

波束成形一詞對於不同的人具有不同的意義。波束成形是能夠將天線陣列的無線圖形套用在特定場景的能力。在蜂巢式通訊空間當中，許多人會認為波束成形就是以特定方向朝著使用者操控一束功率波瓣，如圖 1 中所示。相對的振幅與相位偏移會套用到每組天線元素上，使來自於天線陣列的輸出信號能夠連貫的相加在一起以取得特定的發射/接收角度，並針對其它信號採用破壞性的相互抵消。陣列與使用者所在的空間環境通常不會納入考量。這個的確是波束成形，但只是其中的一個特定實現方案。

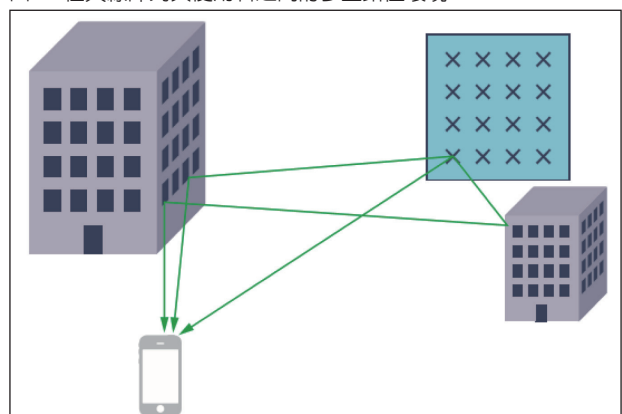
大規模 MIMO 可以被視為是波束成形更普遍意義上的一種形式，但是的確已經從傳統形式中脫離。大規模的意義很單純的就是指基地台天線陣列

圖 1：傳統的波束成形。



中的大量天線。MIMO 意指在相同的時間與頻率資源下，以天線陣列滿足多組分離空間的使用者。大規模 MIMO 也在現實世界系統中獲得認可，天線與使用者

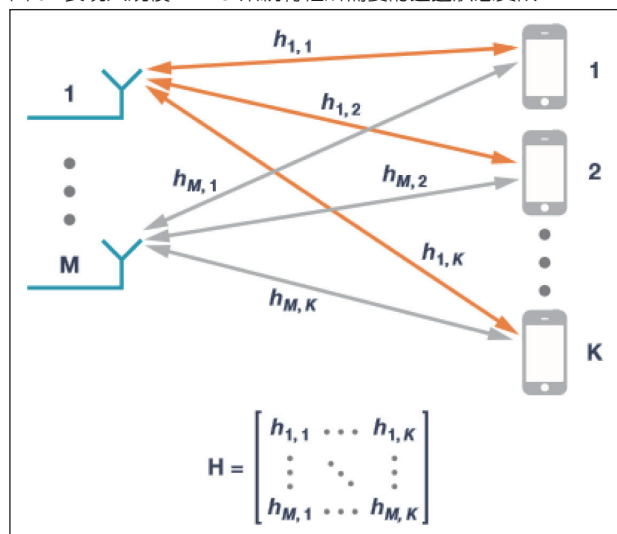
圖 2：在天線陣列與使用者之間的多重路徑環境。



終端 (反之亦然) 之間的資料傳輸會歷經周遭環境的過濾。信號可能會被建築物或是其它障礙物反射出來, 而這些反射就會產生相關的延遲、衰減、以及抵達的方向, 如圖 2 中所示。在天線與使用者之間甚至可能沒有直線的視野。事實證明, 這些非直接傳輸路徑可以利用作為良好的電力。

為了要利用多重路徑的優點, 天線元素與使用者終端之間的空間通道必須要描述其特性。在文獻當中, 這種響應通常被稱為通道狀態資訊 (CSI)。此 CSI 實際上是每組天線與每個使用者終端之間的空間傳輸函數的集合。這些空間資訊會被蒐集在一組矩陣 (H) 當中, 如圖 3 所示。在下個段落我們會專注於 CSI 的概念以及它是如何進行蒐集的更深入細節。CSI 被用來將天線陣列所發射與接收到的資料進行數位編碼與解碼。

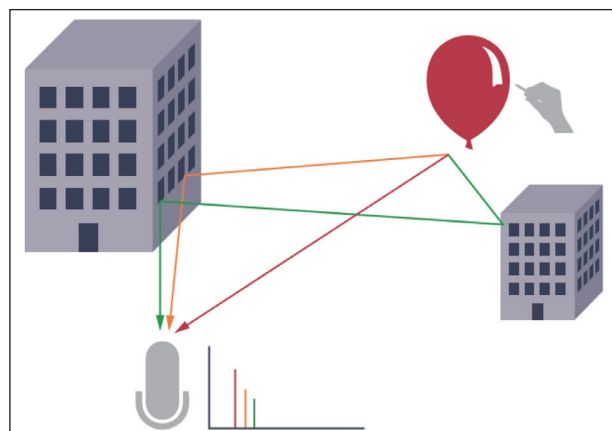
圖 3: 表現大規模 MIMO 系統特性所需要的通道狀態資訊。



呈現基地台與使用者之間空間通道的特性

有一個有趣的比喻是假設有一個氣球在某個位置被刺破而發出聲響, 而這個聲響 (或是脈衝) 會被記錄在另一個位置, 如圖 4 中所示。記錄在麥克風位置的聲響是一個空間脈衝響應, 其中包含了周遭環境中氣球與麥克風特定位置的獨特資訊。被障礙物反射的聲響相較於直接路徑會有所衰減與延遲。

圖 4: 用以呈現通道空間特性的聲音比喻。



假如我們將比喻擴展到與天線陣列 / 使用者終端的狀況中做比較, 那麼我們會需要更多的氣球, 如圖 5 中所示。要注意的是為了要描述每個氣球與麥克風之間通道的特性, 我們必須要在個別不同的時

圖 5: 用以呈現下行連結通道特性的聲音比喻。

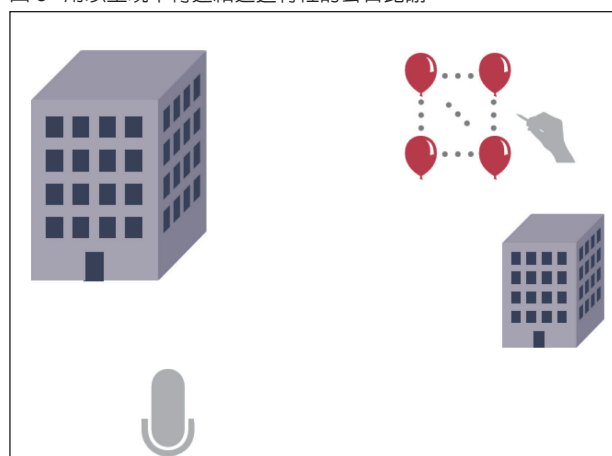
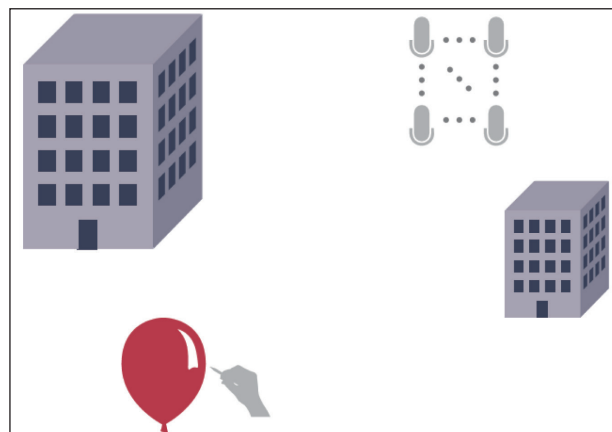


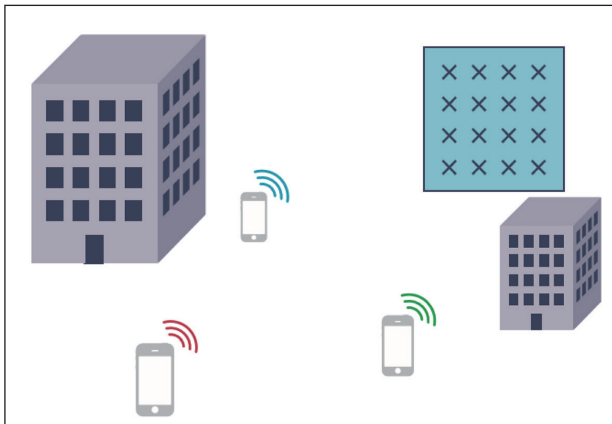
圖 6: 用以呈現上行連結通道特性的聲音比喻。



間刺破氣球，如此麥克風才不會針對不同的汽球交疊記錄其反射。其它方向也需要描述其特性，如圖 6 中所示。在這個範例當中，當氣球在使用者終端位置被刺破時，所有的記錄都可以同步完成。這顯然可以縮短不少所需要花費的時間！

在 RF 空間當中，導頻信號被用來描述空間通道的特性。天線與使用者終端間的空中傳輸通道是有互易性的，意思就是雙向的通道都是相同的。這點是取決於運作於分時雙工 (TDD) 模式下的系統，而不是分頻雙工 (FDD) 模式。在 TDD 模式中，上行連結與下行連結傳輸使用了相同的頻率資源。互易性假設所代表的是通道的特性只需要針對單一方向加以描述即可。上行通道是個明顯的選擇，因為只需要一個由使用者終端發出的導頻信號就可以被所有天線元素接收到。通道估計的複雜度與使用者終端的數量成比例，而非陣列中天線的數量。因為使用者終端可能正在移動中，所以這點是極為重要的，也因此通道估計有需要經常的執行。另一項以上行連結為基礎之特性描述的顯著優點就是高負載的通道估計與信號處理是在基地台進行，而非使用者終端。

圖 7: 每個使用者終端所發射的正交導頻符碼。



所以既然已經建立好了蒐集 CSI 的概念，接下來這個資訊要如何套用到資料信號中以實現空間多工呢？過濾功能是依據 CSI 而設計的，用以將天線陣列所發射的資料進行預編碼，如此多重路徑信號就可以連貫的增加到使用者終端位置中。這樣的過濾功能也可以使用於將天線陣列 RF 路徑所接收到的資料

加以線性組合，如此來自於不同使用者的資料串流就可以被偵測得到。以下部份將會更詳細的說明這點。

實現大規模 MIMO 的信號處理

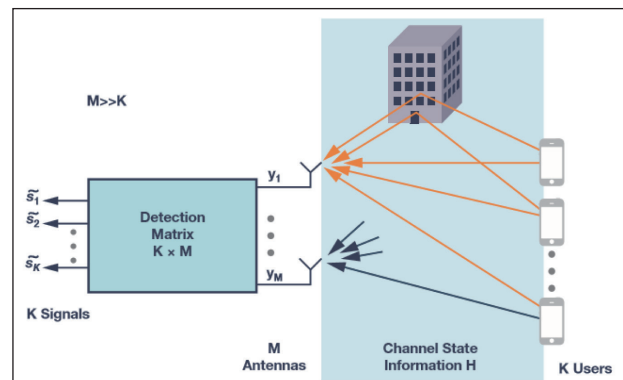
在前文當中我們已經介紹了 CSI(由矩陣 H 表示)要如何估算。偵測與預編碼矩陣是依據 H 計算的。有許多方法可以用來計算這些矩陣。本文將專注於線性方案。線性預編碼 / 偵測方法的範例就是最大比例 (MR)、強制歸零 (ZF)、以及最小均方誤差 (MMSE)。本文不提供 CSI 的預編碼 / 偵測濾波器的全部推導，但是它們最佳化的標準以及每種方法的優點與缺點都會加以討論。對於這些主題的更詳盡處理可以在本文最後的參考資料中找到。^{1, 2, 3}

圖 8 與圖 9 分別針對前述的三種線性方法提供了上行連結與下行連結中信號處理如何運作的描述。對於預編碼也有一些縮放矩陣可以將為了簡化而省略之陣列的功率予以標準化。

最大比例過濾，就如同其名稱所述，是專注於將信號雜訊比值 (SNR) 最大化。從信號處理的觀點來看，這是最為簡單的方案，因為偵測 / 預編碼矩陣就是 CSI 矩陣 H 的共軛倒置或是共軛。這種方法的一大缺點就是忽略了使用者之間的干擾。

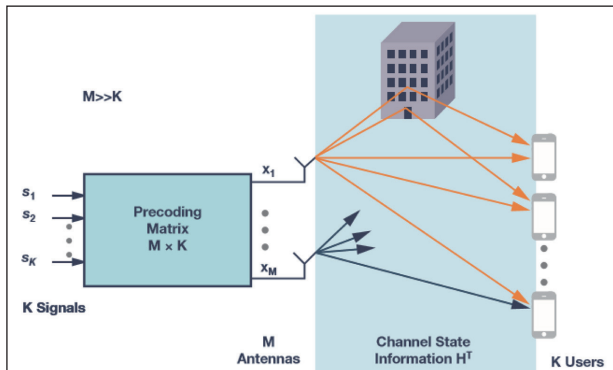
強制歸零預編碼試圖要透過設計出最佳化的標

圖 8: 上行連結信號處理。H 表示的是共軛倒置。



偵測類型	
最大比例 (MR)	$\tilde{s} = H^H y$
強制歸零 (ZF)	$\tilde{s} = (H^H H)^{-1} H^H y$
NMSE 或 RZF	$\tilde{s} = (H^H H + \beta I)^{-1} H^H y$

圖 9: 下行連結信號處理。T 表示的是倒置。* 表示的是共軛。



預編碼類型	
最大比例 (MR)	$x = H^* s$
強制歸零 (ZF)	$x = H^* (H^H H^*)^{-1} s$
MMSE 或 RZF	$x = H^* (H^H H^* + \beta I)^{-1} s$

準，將使用者之間的干擾問題最小化來加以因應。偵測 / 預編碼矩陣是 CSI 矩陣的擬反。計算擬反在運算上比起 MR 狀況中的複雜共軛還要昂貴。然而，透過專注於干擾的最小化，使用者端的接收功率會有所折損。

MMSE 試圖要在獲得最多的信號放大與降低干擾之間取得平衡。這樣的整體觀具有如同價格標籤般的信號處理複雜度。MMSE 方案導入一項用以最佳化的規則化術語，在圖 8 與圖 9 中表示為 β ，使其可以在雜訊共變數與發射功率之間找到平衡。這有時候在文獻中也被稱做規則化強制歸零 (RZF)。

這不是預編碼 / 偵測技術的詳盡清單，但是為主要的線性方案提供了一個概觀。對於這種問題也是有非線性信號處理技術像是鱗紙編碼以及連續干擾消除法可以應用。它們具有最適切的能力，但是在執行上非常的複雜。前述的線性方案對於大規模 MIMO (天線數量變多時) 而言通常都已經足以應付。預編碼 / 偵測技術的選擇會依據運算資源、天線數量、使用者數量、以及系統所處特定環境之多樣性而定。對於天線數量明顯高於使用者數量的大型天線陣列而言，最大比例方案可能就足夠使用了。

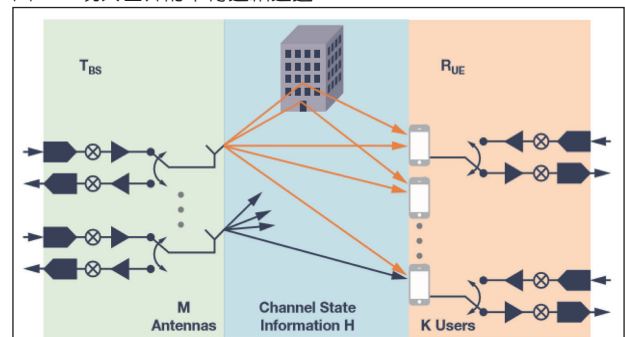
大規模 MIMO 在現實世界系統呈現的實際障礙

當大規模 MIMO 在現實世界情境中執行時，就必須要考慮到更進一步的實際問題。假設有一個範例是具備 32 組發射 (Tx) 與 32 組接收 (Rx) 通道，在 3.5 GHz 波段運作的天線陣列。有 64 組 RF 信號鏈必須要設置於適當的位置，而天線之間的距離大約是 4.2 cm，在指定的頻率當中。有許多的硬體要被包裝在狹小的空間當中。這也意味著必須耗損大量的功率，因而不可避免的就會有溫度方面的考量。Analog Devices 的整合式收發器對於許多這類型問題提供了高效益的解決方案。以下的部份將會更加詳盡的討論 AD9371。

在本文前面的部份曾經討論過，系統為了要大幅減少通道估計以及信號處理的間接成本而進行互易的應用方式。圖 10 中所示為現實世界系統中的下行連結通道。它被分成了三個部份：空中通道 (H)、基地台發射 RF 路徑 (TBS) 的硬體響應、以及使用者接收 RF 路徑 (RUE) 的硬體響應。上行連結則與此相反，RBS 代表了基地台接收器硬體 RF 路徑，而 TUE 則代表了使用者發射硬體 RF 路徑。雖然互易性假設能夠掌握空中介面，但是對硬體路徑則不適用。RF 信號鏈會因為不匹配的走線、RF 路徑之間的同步不良、以及溫度相關的相位漂移而將不精確性導入系統當中。

對 RF 路徑中所有的 LO (本地振盪器) PLL 使用公用的同步參考時脈，以及對基頻帶數位 JESD204B 信號使用同步 SYSREF 將有助於處理

圖 10: 現實世界的下行連結通道。



RF 路徑之間的延遲問題。然而，在系統啟動時的 RF 路徑之間仍然會有一些隨意出現的相位不匹配。溫度相關的相位漂移對此問題又會有更進一步的影響，而且很顯然的，在系統初始化以及之後固定期間的現場校正是有需要的。校正可以實現互易的優點，像是維持基地台的信號處理複雜度，又只有上行連結通道的特性描述保留。通常它可以被簡化，如此一來就只有基地台路徑 (TBS 與 RBS) 需要加以考量。

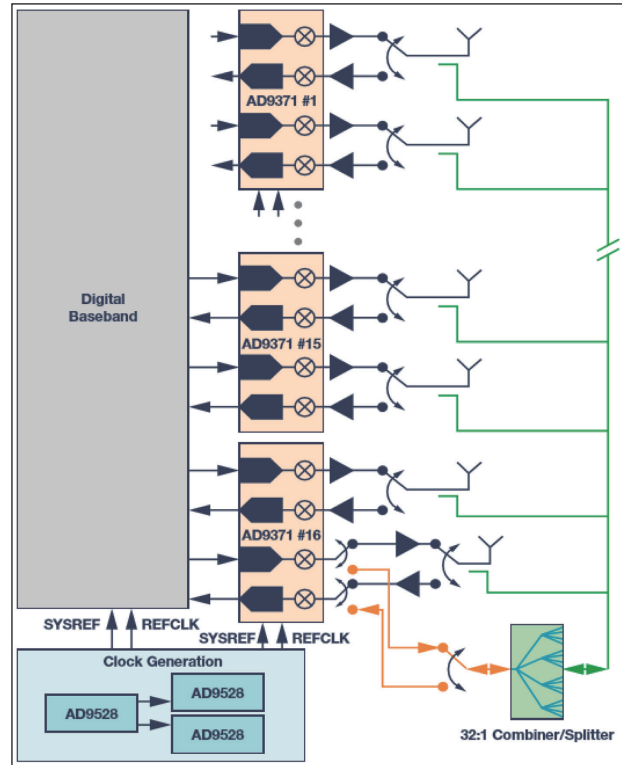
有許多種方案可以用來校正系統。其中有一種是將參考天線謹慎的設置在天線陣列之前，藉以校正接收與發射 RF 通道。以這種方式將天線設置於陣列之前究竟是否適合現場的實際基地台校正，這點是有疑問的。另一種方式是在陣列中現有的天線之間使用交互耦合以做為校正機制。這可能是可行的。而最直接的方法則可能是在基地台的天線之前增加被動耦合路徑。這樣會使硬體域的複雜度提高不少，但是應該可以提供很耐用的校正機制。為了要完整的校正系統，必須從一組指定的校正發射通道發出一個信號，並由所有 RF 接收路徑透過被動耦合連結接收。接下來每個 RF 路徑會依序列將從位於每組天線之前的被動耦合點所獲取的信號發送出去，並予以中繼回返至組合器，然後送到指定的校正接收路徑。溫度相關的效應一般來說改變得很慢，因此這種校正不需要非常頻繁的執行，與通道的特性描述不同。

ADI 的收發器與大規模 MIMO

ADI 的整合式收發器產品系列特別適合需要高密度 RF 信號鏈的應用。AD9371 在 12 mm × 12 mm 的晶片當中具有 2 組發射路徑、2 組接收路徑、以及 1 組觀察接收器、還有用來產生 RF LO 的 3 組分數 N PLL。這種無與倫比的整合度水準讓生產廠商得以用具有時間與成本效益的方式建立複雜的系統。

使用多重 AD9371 收發器的可能系統實現方案如圖 11 中所示。這是一個使用 16 組 AD9371 收發器的 32 組發射、32 組接收的系統。3 組 AD9528

圖 11: 使用 ADI AD9371 收發器的 32 Tx、32 Rx 大規模 MIMO 無線電頭端方塊圖。



時脈產生器為系統提供了參考時脈與 JESD204B SYSREFs。AD9528 是具有 14 組 LVDS/ HSTL 輸出，以及 1 組使用於多重元件同步化的整合式 JESD204B SYSREF 產生器的 2 級 PLL。這些 AD9528 以扇出緩衝組態設定加以安排，其中 1 組做為主要元件，而其部份輸出則被用來驅動從屬元件的時脈輸入與 SYSREF 輸入。這裡面也包含了可能的被動校正機制 (以綠色和橘色顯示)，使用專屬的發射與接收通道，透過分離器 / 組合器來校正所有的接收與發射信號路徑，如同前面曾經討論過的。

結論

大規模 MIMO 空間多工具備了可以改變蜂巢式通訊空間中遊戲規則的技術潛力，提高高流量都會區內蜂巢式能力與效率。多重路徑傳播所導入的多樣性會被利用來實現基地台與多重使用者之間，以相同時間與頻率資源進行的資料傳輸。由於基地台天線與

使用者之間的通道具備了互易性，因此所有的信號處理複雜度可以保留在基地台內，而通道特性描述則可以在上行連結中完成。ADI 的 RadioVerse 整合式收發器產品家族在小巧的空間中實現了高密度的 RF 路徑，因此很適合使用於大規模 MIMO 應用裝置中。

參考資料

1. Xiang Gao. Massive MIMO in Real Propagation Environments. Lund University, 2016.
2. Michael Joham, Josef A. Nossek, and Wolfgang Utschick. "Linear Transmit Processing in MIMO Communications Systems." IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 53, Issue 8, Aug, 2005.
3. Hien Quoc Ngo. Massive MIMO: Fundamentals and System Design. Linköping University, 2015.

作者介紹



Claire Masterson [claire.masterson@analog.com] 是 Analog Devices 位於 Limerick 通訊系統團隊的系統應用工程師，負責系統執行方案、軟體開發、以及演算法則開發等工作。Claire 在都柏林的 Trinity College 取得 BAI 與 PhD，並於 2011 年畢業之後加入了 ADI。 

Altix 實現智慧農業解決方案 示範計畫落點日本

在全球性軟體和產品設計服務公司 Altix Innovations 的技術支援下，ADI(Analog Devices, Inc.) 日本子公司 Analog Devices K.K 日前在日本進行了一項智慧農業示範計畫。

這項針對日本草莓溫室農場示範計畫的目的是希望能夠利用物聯網技術的力量來提高農場草莓的產量和品質。Altix Innovations 藉由其易於使用的 BoxPwr 軟體框架為感測器節點和閘道裝置提供軟體技術。

Altix 的 BoxPwr 是一種可授權的軟體元件框架，旨在解決不同的物聯網部署場域中，安全連接和管理設備時所面臨的挑戰。它是一種模組化、高度可配置和基於標準的框架，預先整合在多種硬體平台上，可以根據從極低功耗的裝置到全方位服務閘道器等設備的不同要求，輕鬆地擴展。

Analog Devices K.K 物聯網業務開發主管角川隆彦 (Takahiko Kadokawa) 表示：“智慧農業解決方案可為農民的生活和農業生產力帶來正面的影響。Altix 因為具有在 ADI 平台上進行網路感測器應用開發的軟體和系統專業知識，所以我們選擇該公司作為此一解決方案的合作伙伴。”

Altix 共同創辦人暨執行長 Shyam Vedantam 表示：“Altix 很榮幸能夠與 ADI 公司合作，成為日本智慧農業下一代創新浪潮的一部分。借助我們全面性的物聯網軟體和服務等產品組合，我們已經做好準備，可以提供更多的創新解決方案來解決複雜的現實問題。”

隨著市場對智慧農業、智慧城市和工業 4.0 的意識越來越高，機會也越來越多，Altix 正與多家技術創新廠商和先驅者合作打造多種解決方案，並參與建立可行的生態系統，以實現業務的成長。